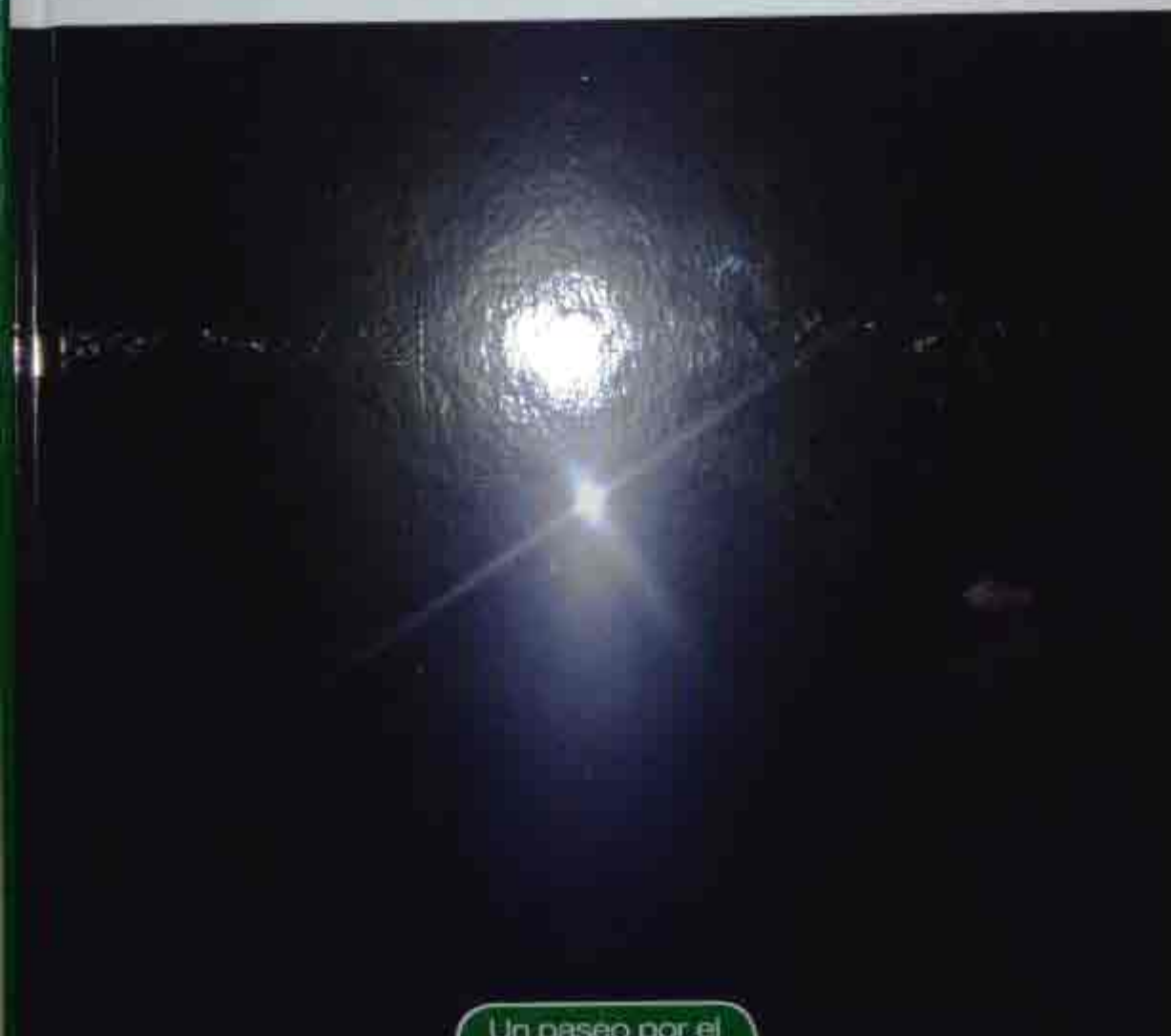


El vacío y la nada

¿Qué había antes
del Big Bang?



Un paseo por el
COSMOS

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigiralización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmoeau.blogspot.com/>

El vacío y la nada

¿Qué había antes
del Big Bang?

RBA

Imagen de cubierta: Hay regiones del cosmos, como el espacio interestelar, en las que predomina el vacío; son aquellas en las que la ausencia de partículas y de energía es casi total.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Enrique Fernández Borja por el texto
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.
© 2015, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Archivo RBA: 20-21, 25, 31b; A. Bolton (UH/IfA)/SLACS/
NASA/ESA: 88-89; CERN: 70-71; ESA/D. Ducros: 104-105; ESA/AOES
Medialab: 108, 109 (fotos insertas); NASA/JPL-Caltech/ESA: 102;
Photobucket: portada; Science Photo Library/Age Photostock: 31a.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de
esta publicación puede ser reproducida, almacenada
o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-8306-1

Depósito legal: B-19605-2015

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - Printed in Spain

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	El vacío no es nada 13
CAPÍTULO 2	Las manifestaciones del vacío 37
CAPÍTULO 3	El vacío y la masa, una relación delicada 57
CAPÍTULO 4	El universo, ¿un gran préstamo del vacío? 81
CAPÍTULO 5	¿Vacío? Depende de a quién le preguntes 127
LECTURAS RECOMENDADAS	151
ÍNDICE	153

INTRODUCCIÓN

////////////////////////////////////

Se define el vacío como ausencia total de materia y de energía en una región del espacio. Así podemos tener diferentes grados de vacío que se determinan comparando la presión en una determinada región o recipiente respecto a la presión atmosférica. Hoy día la tecnología permite generar vacíos muy altos, por ejemplo en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN (LHC, por sus siglas en inglés *Large Hadron Collider*). En los tubos de ese acelerador de partículas, donde se inyectan protones para hacerlos colisionar unos con otros, se consigue generar y mantener un vacío de 10^{-13} atmósferas, es decir, 0,0000000000001 veces la presión que soportamos a nivel del mar. Esto se mantiene a lo largo de todo el sistema de tubos del acelerador, cerca de 54 km. El vacío conseguido es mayor que el que existe en el espacio intergaláctico; en este último hay trazas de materia, rayos cósmicos o la radiación cósmica de fondo. Solo esta última ya tiene una temperatura de 2,7 K (el cero absoluto, 0 K, equivale a $-273,15$ °C). El LHC requiere electroimanes muy potentes, pero para que estos funcionen deben estar muy fríos. Además se necesita un alto vacío en los tubos para que las partículas aceleradas no choquen contra nada excepto contra ellas mismas.

La temperatura en los tubos y el sistema de electroimanes del acelerador LHC es de 1,9 K, menor que la del espacio exterior.

Aparte de esta maravilla de la tecnología como la de generar un vacío tan alto para un experimento tan grande y delicado, hay muchos procesos industriales que se realizan en vacío porque su eficiencia en dichas condiciones es mayor. Procesos como, por ejemplo, la creación de polímeros en superficies, el coloreado de vítreos o la producción de metales de gran pureza es mejor hacerlos en un medio que se encuentre a muy baja presión, es decir, de alto vacío. En ingeniería, las técnicas que trabajan con el vacío han tenido un gran desarrollo.

El vacío ha sido una idea recurrente desde los primeros intentos del hombre por estudiar y comprender la naturaleza. La idea introducida por Aristóteles de que la naturaleza aborrecía el vacío dominó el pensamiento científico durante siglos. Según esta concepción no era posible generar el vacío porque la naturaleza se encargaba de rellenarlo de algún modo. No fue hasta el siglo XVII, siguiendo ideas propuestas por Galileo, que Torricelli demostró científicamente que el vacío era posible. Ahora bien, ese vacío no podía ser total. Debía contener alguna sustancia sutilísima que hiciera de medio transmisor de las ondas lumínicas. Buena parte de la física del siglo XIX estuvo dominada por los intentos de detección de este «éter», un resabio de aristotelismo que se resistía a morir.

Las revoluciones relativista y cuántica de principios del siglo XX cambiaron para siempre nuestras concepciones del vacío. El éter desapareció de escena pero lo que dejó tras de sí no fue una nada absoluta, sino el vacío entendido como un estado de los sistemas físicos, claramente definido y con el que se puede interactuar.

La física moderna define el vacío como el estado de mínima energía de los sistemas cuánticos. Pero este vacío no es algo inerte, está en permanente cambio con continuas fluctuaciones que varían su energía arriba y abajo de forma que su promedio siempre sea el valor que esperamos para un estado de mínima energía. Estas fluctuaciones se pueden interpretar como aparición de partículas desde el vacío y su posterior reabsorción en

el mismo. En cierto sentido el vacío da una energía en préstamo que se expresa en forma de partículas y luego se reintegra al vacío. Este proceso de creación y desaparición está permitido por las leyes cuánticas que establecen que el tiempo en el que esas partículas están presentes es muy corto y tanto menor cuanto más energía se haya sustraído del vacío para generarlas. Por su misma naturaleza estas fluctuaciones no son observables directamente. La teoría predice al mismo tiempo su existencia y su característica de no observables.

La situación parece poco esperanzadora para los investigadores, sin embargo, la propia física nos proporciona medios indirectos para poder observar fenómenos que, sin tener en cuenta el papel que juega el vacío en ellos, no tendrían explicación.

Es importante clarificar aquí qué se entiende por vacío en la concepción moderna de la física. La definición clásica de «región con total ausencia de materia» ya no nos sirve porque a la luz de la física contemporánea materia y energía son aspectos distintos de una misma entidad. Así que el vacío del que hablamos hoy hace referencia a «una región del espacio donde hemos eliminado toda partícula y toda energía». Pero el *vacío cuántico* no coincide con la *nada filosófica* porque la cuántica muestra que hay una cantidad de energía, la mínima que puede tener un sistema físico, que no puede ser extraída. Los sistemas físicos tienen un mínimo de energía y a ese estado se le denomina *vacío*. Además, ese vacío se encuentra en permanente fluctuación.

Hoy en día, se puede asegurar que el vacío es un elemento esencial en la definición del comportamiento de los sistemas cuánticos como, por ejemplo, la versión cuántica del campo electromagnético. Desde el punto de vista cuántico los campos se pueden estudiar como conjuntos de partículas asociadas a los mismos, cada campo tiene una o varias partículas asociadas con distintas características según el campo del que se trate. Se encuentran partículas con cargas eléctricas, partículas neutras, partículas que se mueven a la velocidad de la luz o que no pueden moverse a dicha velocidad, etc. Así, el vacío, el estado de mínima energía, está asociado también al estado en el que tampoco hay presentes partículas asociadas a los campos descritos por la cuántica.

Lo que vamos a encontrar en el estudio del vacío es que hay formas de interactuar con él para que revele sus fluctuaciones y la energía que contiene. Veremos que hay propiedades del comportamiento de los átomos que dependen de la existencia de un vacío con estructura que modifica la interacción de núcleos y electrones, dejando una huella que se puede medir experimentalmente. De hecho, la ciencia está empeñada en mostrar que se pueden extraer partículas del vacío si se le inyecta la energía necesaria. La constatación experimental de que se pueden generar partículas del propio vacío sería un avance sorprendente y maravilloso. La física teórica dice que es posible, así que es cuestión de tiempo que se encuentre la tecnología que haga posible este experimento.

Pero la cosa no acaba ahí, el vacío cuántico se ha revelado como el ingrediente esencial para entender una cuestión tan básica como la que concierne a la pregunta de por qué algunas partículas tienen masa. Ahora sabemos que la masa de las partículas que nos conforman, y por lo tanto nuestra propia masa, tiene su origen en dos formas de vacío, el vacío del campo de Higgs y el vacío que se encierra dentro de protones y neutrones. Una magnífica prueba, que se está confirmando experimentalmente, de la influencia del vacío en la física más fundamental.

Pero sin duda alguna, lo más asombroso que podemos afirmar sobre el vacío es que, hoy día, hay muchas sospechas de que nuestro universo apareció desde el vacío y que está tendiendo al mismo. Las teorías sobre el origen y evolución del universo que están recibiendo mayor respaldo en la comunidad científica, por ser las que mejor responden a las observaciones cosmológicas más recientes, determinan que las propiedades de nuestro cosmos son compatibles con que haya surgido del vacío. Si se confirmara esta premisa supondría una revolución a muchos niveles y, por ello, se están haciendo muchos esfuerzos para aclarar esta línea de investigación. Por supuesto, este no es un tema cerrado ni mucho menos, pero el avance en el estudio del universo y su origen parece indicar que la idea del vacío como generador de universos es muy factible. Hace ya unas décadas se demostró que vivimos en un universo que se expande aceleradamente y

parece que la causa de esa aceleración es una energía que genera gravedad repulsiva, la famosa energía oscura. Aunque todavía no sabemos cómo se origina la energía oscura ni cómo se comporta exactamente, sabemos que está asociada al vacío y que, a día de hoy, está determinando la evolución del universo.

Por último, otra cuestión acerca del vacío que sorprendió a los físicos de mediados del siglo xx fue que en determinadas situaciones no se puede definir para todos los observadores. Es decir, cuando un determinado observador, algo o alguien que puede hacer medidas físicas y que tiene un determinado estado de movimiento, determina que existe un estado de vacío cuántico en una región del espacio-tiempo puede que otro observador vea dicho estado repleto de partículas. Eso es lo que ocurre por ejemplo en los agujeros negros dando lugar a la conocida como *radiación Hawking*. Sin embargo, este fenómeno concreto no es más que una versión de una familia de fenómenos físicos asociados a esta falta de definición global del vacío cuántico para todos los observadores en determinadas circunstancias.

Enfrentarse al vacío cuántico es situarse en la frontera de muchas ramas de la física más fundamental. Podemos asegurar sin temor a equivocarnos que solo hemos descubierto una mínima parte de las sorpresas que nos va a deparar el estudio del vacío. Hoy por hoy, muchas de las investigaciones en campos como la física de partículas, la física gravitatoria y la cosmología está íntimamente relacionada con el concepto de vacío porque este permea cada rincón de la física más básica. Cualquier avance que se haga en las teorías fundamentales de la naturaleza afectará al concepto de vacío y, seguramente, vendrá de su mano.

Sin duda hemos recorrido un largo camino desde el *horror vacui* aristotélico hasta nuestros días. La humanidad ha pasado de creer que la naturaleza aborrece el vacío a encontrar que dicho concepto, matizado por la cuántica, juega un papel esencial en nuestro entendimiento del universo desde el nivel más básico de la materia hasta la estructura a gran escala del cosmos. Mucho queda por hacer, mucho queda por estudiar y por investigar en este terreno. Es importante insistir en que la visión que tenemos del vacío cuántico aún es incipiente: quedan muchos elementos

que todavía no conocemos relacionados con la estructura de la materia que podrían cambiar de una manera radical nuestro entendimiento actual del vacío. Pero no se puede obviar el hecho de que vivimos en una época donde es ineludible enfrentarse al vacío y explorar todas las consecuencias derivadas de su definición. Las preguntas que quedan por resolver van desde la estabilidad del vacío, si este podría cambiar con desastrosas consecuencias, hasta la existencia de múltiples vacíos en los que se pueden desarrollar diferentes universos con diferentes leyes físicas y con una composición de campos y partículas diversa.

Nuestra capacidad tecnológica para hacer experimentación fundamental que nos ayude a dilucidar la naturaleza y el comportamiento del vacío está llegando a su límite. Pero la humanidad ha mostrado una y otra vez que los límites científicos y tecnológicos están para superarlos. La energía que necesitamos para explorar cuestiones relativas al vacío cuántico, su relación con la masa de las partículas o con el propio origen del universo es mucho mayor que la que podemos generar y mantener. Pero en un futuro próximo, de una forma u otra, nos enfrentaremos cara a cara con el vacío y desentrañaremos todos sus secretos. Por ello, lo que vamos a contar en este libro es una historia inconclusa que deja más preguntas que respuestas.

CAPÍTULO 1

El vacío no es nada

La ciencia moderna tiene una visión del vacío que dista mucho de la idea tradicional de un espacio inerte y sin contenido. Considerado una imposibilidad durante la mayor parte de los últimos veinte siglos, para la relatividad y la mecánica cuántica el vacío, en cambio, está lleno de posibilidades.

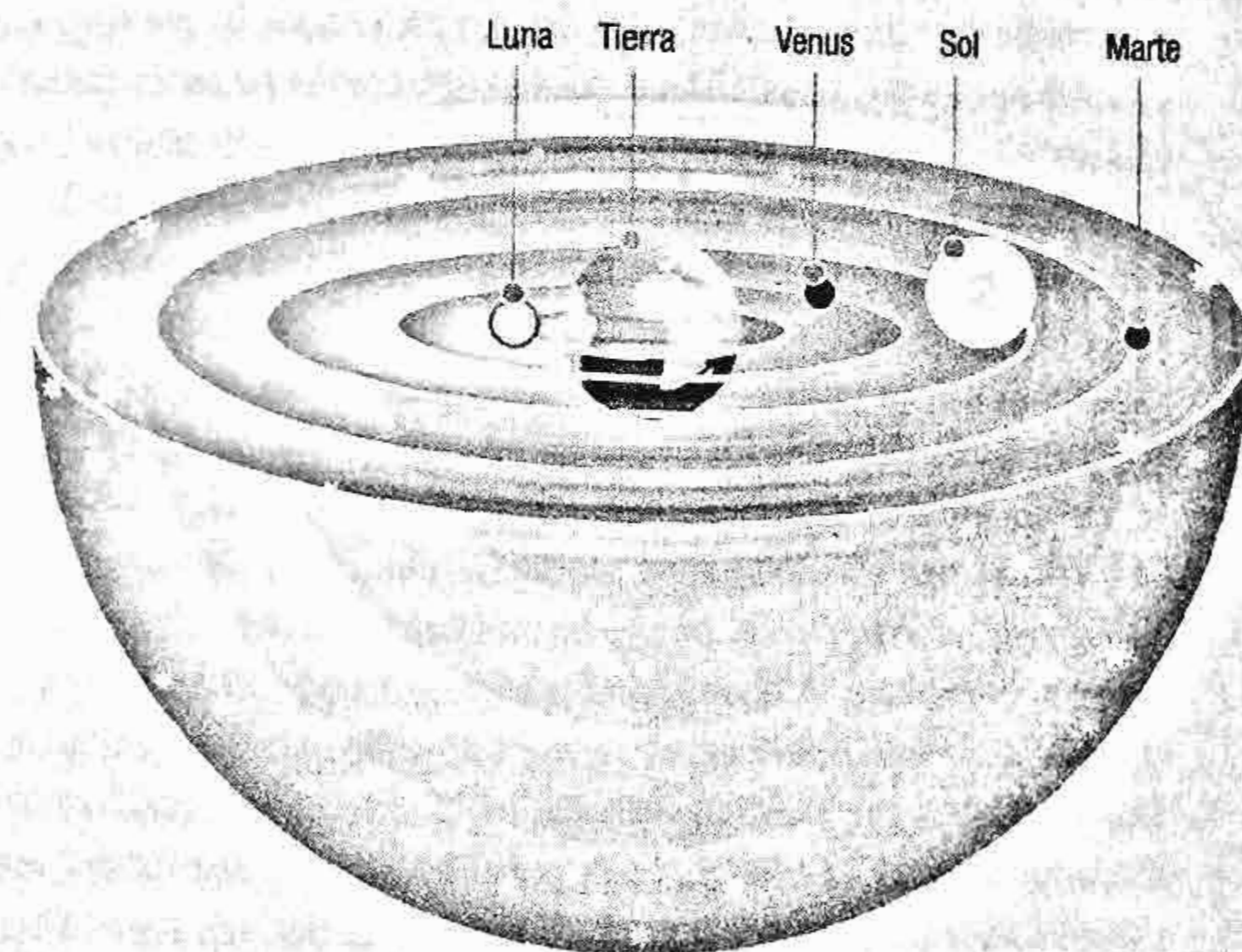
«Nada puede surgir de la nada.» Así de contundente se mostraba Parménides de Elea en el siglo VI a.C. Para este destacado filósofo presocrático, la existencia no puede venir de la «no-existencia» ni el «ser» convertirse en «no-ser». Todo lo que nos rodea es un «ser» eterno e infinito, con lo que la idea de un espacio perfectamente vacío sería equivalente a afirmar la existencia del «no-ser», es decir, un absurdo. Este rechazo a la noción de vacío como algo impensable, como una especie de imposibilidad lógica, sería el mayoritario en los pensadores griegos anteriores y posteriores y, a través de ellos, ejerció una poderosa influencia en todo Occidente durante muchos siglos. Sin embargo, hubo una excepción notable: la de la escuela atomista de los siglos V y IV a.C., capitaneada por Leucipo y Demócrito. Dicha escuela sostenía que la naturaleza se dividía en dos grandes categorías: los átomos, elementos indivisibles que conformaban la materia, y un vacío absoluto en el que estos elementos se movían e interactuaban. De acuerdo con la cosmovisión atomista, el vacío era tan real como lo lleno —la materia—, con lo que se desvanecían todas las engorrosas paradojas acerca de «la existencia de la nada».

Aristóteles, que vivió a mediados del siglo IV a.C., tenía una idea muy diferente. En la física aristotélica, los cuerpos y las sustancias del mundo sublunar (el situado más acá de la Luna y que incluía nuestro planeta) tienen asociados movimientos que les son propios. Así, una roca o una masa de agua se mueven de forma natural hacia abajo; por el contrario, el aire y el fuego se mueven de forma natural hacia arriba. Aristóteles argumentaba que, si existiera el vacío en el sentido atomista, no habría noción de «arriba» o «abajo» y, por lo tanto, las sustancias no «sabrían» en qué dirección moverse. En el mundo supralunar, por su parte, todo estaba empapado de una «divina sustancia»: el éter. El éter tenía propiedades tales como ser transparente e incorruptible. Lo que aparentemente se nos muestra como vacío al mirar una noche estrellada, en realidad, está repleto de esta sustancia sutil; dicho de otro modo, el universo era un *plenum*. El vacío, sostuvo el estagirita, no existe en la naturaleza. Tradiciones posteriores añadieron matices a la visión aristotélica general, como en el caso de los estoicos, quienes, en el siglo III a.C. reemplazaron el éter con otra sustancia similar, la *pneuma*; una mezcla de aire y fuego que se identificaba con una fuerza vital que cohesionaba y daba sentido a la materia. Pero eran variaciones sobre un mismo tema. La única oposición consistente vino de la mano del romano Lucrecio, que en el siglo I a.C. rescató la cosmovisión atomista en el poema *De rerum natura* (*Sobre la naturaleza de las cosas*). Sin la existencia de vacío, arguyó Lucrecio, no se podía entender el movimiento ya que los cuerpos no tendrían lugares vacantes que ocupar. Pero el momento de esa idea todavía no había llegado.

Durante la Edad Media, los filósofos escolásticos asumieron las ideas de Aristóteles de que el vacío no existía en la naturaleza ni se podía crear. Es en esta etapa donde se introduce la famosa noción de que la naturaleza aborrece el vacío, u *horror vacui*. Sin embargo, existía una tensión entre la cosmología aristotélica y la doctrina católica acerca de cómo se había creado el mundo. De hecho, la Iglesia no aceptaba que Dios estuviera constreñido por regla alguna, proviniera de la filosofía de Aristóteles o de cualquier otra fuente. La asunción de que el vacío no se podía

EL COSMOS ARISTOTÉLICO

Aristóteles es uno de los filósofos más influyentes de la cultura occidental. Nació en Estagira en el año 384 a.C., y a la edad de dieciocho años ingresó en la Academia de Platón, donde permaneció dos décadas. Fue preceptor de Alejandro Magno, tras lo cual regresó a Atenas y fundó el Liceo. Murió en Calcis de Eubea el 322 a.C. Con Aristóteles arranca el estudio de las disciplinas que hoy día conocemos como lógica, física, astronomía y biología. Entre sus ideas más conocidas podemos destacar la teoría de la generación espontánea de los organismos o la distinción, en metafísica, entre «acción en potencia» y «acción en acto». A él se debe el estudio de los silogismos lógicos, mediante los cuales se llega, de unas premisas ciertas, a una conclusión necesariamente cierta. La cosmología aristotélica situaba en el centro del universo a la Tierra inmóvil, alrededor de la cual giraban las diferentes esferas de planetas y estrellas movidas por un «primer motor» independiente de cualquier elemento externo. Aristóteles dividía lo existente entre un nivel sublunar y el nivel supralunar. El sublunar estaba compuesto por los cuatro elementos: aire, agua, fuego y tierra. Estos elementos se podían generar y corromper. El supralunar, en cambio, estaba formado por el éter, sustancia no generada e incorruptible. El éter impregnaba todas las esferas superiores y condicionaba el tipo de movimiento de las esferas: en efecto, el éter perfecto solo podía moverse y ser transmitido por un movimiento también perfecto, esto es, el circular.



La concepción aristotélica del cosmos situaba a la Tierra en su centro, y a la Luna, Venus, el Sol, Marte y las estrellas en esferas que giraban a su alrededor, impregnadas estas por una sustancia llamada éter, que condicionaba su movimiento perfectamente circular.

Muchos han argüido que el vacío no existe; otros afirman que solo existe con gran dificultad y a pesar de la repugnancia que siente por él la naturaleza; no sé de nadie, sin embargo, que afirme que existe fácilmente, sin resistencia natural alguna.

EVANGELISTA TORRICELLI

madamente 1 m de longitud relleno de mercurio, taparlo por su extremo abierto, darle la vuelta e introducirlo en un barreño lleno también de mercurio. Se observaba que la columna del tubo descendía hasta los 76,2 cm, dejando un vacío en su extremo superior. De un plumazo quedaron barridos siglos de autoridad aristotélica.

El experimento de Torricelli llegó tarde para evitar que Descartes quedara en mal lugar negando nuevamente la posibilidad del vacío en su obra *Principia Philosophiae*. El espacio, arguyó el francés, solo se podría explorar si estaba repleto de materia, por lo que el cosmos debería de estar lleno de alguna sustancia. Ideas similares fueron enunciadas por otros filósofos como Hobbes o Leibniz.

Del bando de la física experimental, la labor de Torricelli fue retomada por el irlandés Robert Boyle (1627-1691) y el británico Robert Hooke (1635-1703). El segundo diseñó ingeniosas bombas de vacío que el primero empleó en toda clase de experimentos dirigidos a determinar las propiedades del aire y los gases. Los trabajos de Boyle y Hooke hubieran despertado con seguridad las iras de las agencias protectoras de animales puesto que consistían, por ejemplo, en disponer a un animal en una jarra hermética de la que poco a poco se iba extrayendo el aire (lo que les permitió constatar que el aire no solo era esencial para la vida sino que tenía que ser un aire «fresco», no procedente de la exhalación de otro animal). Boyle eludió toda discusión filo-

crear ni natural ni artificialmente se mantenía con la condición de que dicha imposibilidad no se extendiera a la voluntad de Dios. Es por ello que el vacío pudo ser estudiado: su existencia no iba en contra del orden divino.

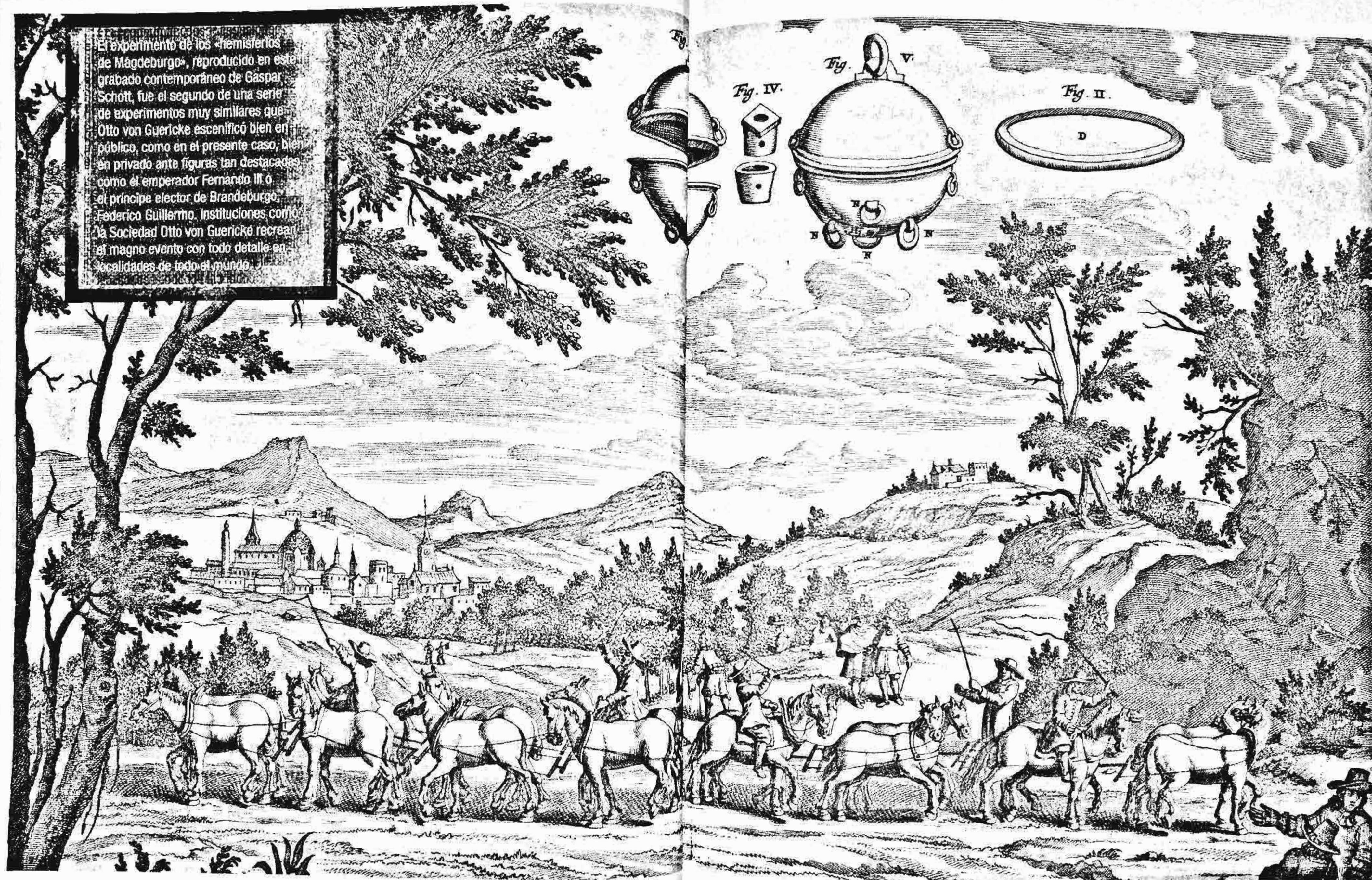
En este contexto irrumpió el italiano Evangelista Torricelli (1608-1647), discípulo de Galileo, que en 1644 llevó a cabo un experimento que revolucionó la física del vacío. La idea era simple: tomar un tubo de aproxi-

sófica o religiosa y propuso una definición de vacío meramente operativa: el vacío es el espacio en el que todo el aire ha sido retirado.

En 1654, diez años después de Torricelli, el físico y jurista alemán Otto von Guericke (1602-1686) hizo una demostración espectacular del poder del vacío en la ciudad de Magdeburgo. Von Guericke extrajo el aire de dos hemisferios metálicos de medio metro de diámetro previamente unidos para formar una esfera y procedió a atar sendas recuas de ocho caballos a cada uno de los hemisferios. A continuación, espoleó a los caballos para que tiraran de los extremos de la esfera en direcciones opuestas con el objetivo de separarla. Los animales piafaron y porfiaron durante largos minutos sin conseguir su objetivo (de hecho, se hubieran necesitado cerca de 20 000 N de fuerza). El experimento, conocido como «los hemisferios de Magdeburgo», fue la comidilla de toda Europa: ¿cómo era posible que un espacio vacío encerrara tanta fuerza? La razón era que la presión en el interior era mucho más baja que en el exterior, por lo que toda la atmósfera estaba presionando para mantener unidos los hemisferios. ¡Los pobres caballos estaban luchando contra el peso de la atmósfera! Von Guericke demostró que, introduciendo una pequeña cantidad de aire en la esfera, esta se desmontaba con total facilidad. Además de sus experimentos, el alemán postuló una cosmología donde el vacío jugaba un rol preponderante. Introdujo el concepto de un vacío infinito, divino y sin dimensión, y consideró que toda la creación tenía su origen y su lugar en esta nada que, en esencia, era la expresión de Dios.

El gran Isaac Newton, en sus obras *Hipótesis de la luz* (1675) y *Óptica* (1704), discutió extensamente el concepto de éter como aquella sustancia sutil que era capaz de vibrar y, por lo tanto, soportar la transmisión de la luz. Esta sustancia se encuentra en todos los lugares del universo siendo su presencia más o menos importante en función de si hay más o menos materia. El éter newtoniano, además de permitir la propagación de la luz, podía ser el soporte en el que la interacción gravitatoria se transmitía de un cuerpo a otro. Lo cierto es que en la formulación más acabada de la ley de la gravitación universal, la de los *Principia*

El experimento de los «hemisferios de Magdeburgo», reproducido en este grabado contemporáneo de Gaspar Schott, fue el segundo de una serie de experimentos muy similares que Otto von Guericke escenificó bien en público, como en el presente caso, bien en privado ante figuras tan destacadas como el emperador Fernando III o el príncipe elector de Brandeburgo, Federico Guillermo. Instituciones como la Sociedad Otto von Guericke recrean el magno evento con todo detalle en localidades de todo el mundo.



Mathematica (1687), no hacía mención alguna acerca del éter ni de ningún otro medio de transmisión de la gravedad, lo que hizo que Leibniz y otros contemporáneos le acusaran de creer en una misteriosa acción a distancia más propia del ocultismo. El éter pudo haber sido una excusa no del todo sincera para acallar dichas críticas. De hecho, ni siquiera necesitaba de él para explicar la transmisión de la luz puesto que era firme partidario de la teoría corpuscular, según la cual aquella se propagaba mediante partículas o corpúsculos.

En el tiempo que transcurrió entre Newton y el escocés James Clerk Maxwell (1831-1879), pionero del electromagnetismo, el éter fue adquiriendo más propiedades, como la de permitir el tránsito de las corrientes eléctricas, las interacciones magnéticas y la propagación de las sensaciones a través de impulsos nerviosos, así como la de ser responsable de las reacciones químicas. Pero todas estas explicaciones se introducían por lo general *a posteriori* de los fenómenos observados. Como señaló el propio Maxwell, la idea de éter no proporcionaba ninguna predicción contrastable *a priori*. A pesar de ello, la teoría electromagnética a él debida daba por descontada la existencia del éter como medio en el que los fenómenos eléctricos y magnéticos —así como los luminosos, que no eran más que radiación electromagnética— tenían lugar.

EL ÉTER SE DESVANECE EN EL VACÍO

El éter era necesario en la medida que la luz fuera un fenómeno ondulatorio y, por tanto, necesitara un medio a través del cual propagarse. La naturaleza de la luz había sido tema de encendido debate entre eminencias tales como Descartes o Huygens, favorables a la tesis ondulatoria, y Newton y Pierre Gassendi, partidarios de la corpuscular. A principios del siglo XIX parecía que la primera opción ganaba enteros gracias a los descubrimientos de Thomas Young (1773-1829) o Augustin-Jean Fresnel (1788-1827). Pero para soportar unas ondas lumínicas que se movieran a una velocidad que ya en esa época se sabía que era altísima (en 1851,

por ejemplo, el astrónomo francés Hyppolite Fizeau la había fijado en 315 000 km/seg), el éter debía de tener propiedades poco usuales. Por un lado, se tenía que comportar como un sólido elástico que pudiera oscilar a gran velocidad y, por otro, no podía interactuar con la materia (o habría sido detectado mucho antes). Ante esta situación se imponía la necesidad de dilucidar su existencia.

Volvamos de nuevo dos siglos atrás para trazar una breve historia de los intentos de detección de esta misteriosa sustancia. En 1727, el astrónomo de la Corona inglesa, James Bradley (1693-1762), encontró un fenómeno asociado a la observación de las estrellas denominado aberración estelar y que consiste en el cambio de posición de las estrellas por causa del sentido de movimiento de la Tierra. Bradley concluyó que si la Tierra se está moviendo a través del éter, pueden ocurrir dos cosas: o bien la Tierra arrastra el éter con ella (lo que supondría que el éter tiene cierta viscosidad y se queda pegado a nuestro planeta) o, por el contrario, el movimiento terrestre no arrastra al éter y, por tanto, se genera un «viento de éter». Dado que la aberración estelar se demostró incompatible con la hipótesis del arrastre, había que encontrar el viento de éter. A su vez, si la luz se propagaba por el éter, su velocidad cambiaría en función de si estaba a favor o en contra del viento etéreo. Las mediciones de la velocidad de la luz no apoyaron esta segunda opción. En 1881, el físico estadounidense de origen polaco y premio Nobel Albert A. Michelson (1851-1931) y su compatriota Edward W. Morley (1838-1923) realizaron un experimento para medir la velocidad de la luz en diferentes direcciones sobre la Tierra. Para sorpresa, no solo de los dos experimentadores sino de la comunidad científica en pleno, encontraron que dicha velocidad era la misma en todas las circunstancias. El viento de éter parecía no existir.

Aunque no había ni viento de éter ni arrastre del mismo por parte de la Tierra, los físicos no renunciaron todavía a tan venerable sustancia e hicieron intensos esfuerzos de imaginación para acomodar teoría y observación. El físico neerlandés Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) introdujo la idea de que los cuerpos se contraían en la dirección de movimiento, lo que po-

día explicar el resultado nulo del experimento de Michelson. El precio a pagar fue la convivencia forzada con un éter con las propiedades asombrosas de elasticidad y sutilidad ya conocidas y para colmo, indetectable. Era un éter *de facto* equivalente al vacío, un algo que se distinguía muy poco de la nada.

Tuvo que llegar Einstein, en 1905, y construir una nueva visión del mundo en el que no había necesidad alguna de éter. Su teoría de la relatividad especial fue capaz de explicar el electromagnetismo y los fenómenos luminosos, incluidos la aberración estelar y los resultados de Michelson y Morley. Desprovisto de éter, el vacío parecía sumirse de nuevo en el silencio absoluto al que le habían relegado los atomistas. Pero la naturaleza se guarda siempre un as bajo la manga y gracias al propio Einstein y la relatividad general y, sobre todo, la mecánica cuántica, el vacío ha acabado reclamando voz y voto en nuestra visión del universo. El vacío cuántico es totalmente sorprendente, lleno de actividad, cuya influencia puede rastrearse en distintos sistemas y fenómenos físicos fundamentales.

EL VACÍO Y LA RELATIVIDAD

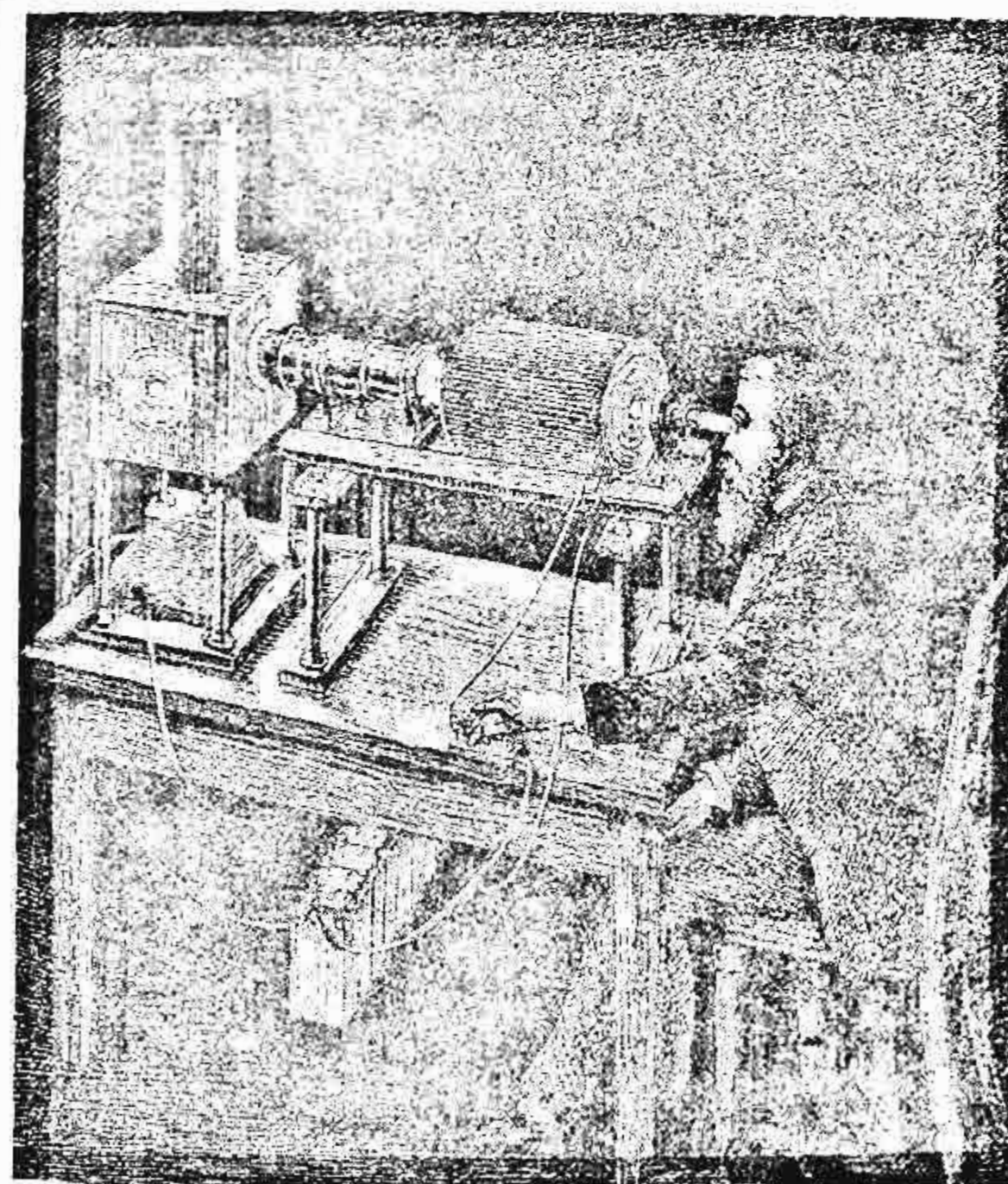
La relatividad especial es un marco en el que todas las teorías físicas han de verse definidas. Es decir, toda teoría física que describa tal o cual fenómeno o rango de fenómenos ha de ser consistente con los principios de la relatividad especial. Se puede decir que es una teoría de sentido común con final sorprendente, y se fundamenta en dos ideas:

- Todo observador que se mueve en línea recta y velocidad constante, u observador inercial, describe unas mismas leyes de la física.
- Existe una velocidad en el universo que es la misma para todo observador inercial, independientemente de su velocidad o dirección de movimiento. Esta velocidad resulta ser la velocidad de la luz en el vacío.

ONDAS A LA VELOCIDAD DE LA LUZ

Con los trabajos de James Clerk Maxwell se unificó la descripción de los fenómenos eléctricos y magnéticos y se dieron las ecuaciones que gobiernan su comportamiento. Una de las consecuencias más interesantes de esta teoría es la existencia de campos eléctricos variables que generan campos magnéticos variables, los cuales, a su vez, generan campos eléctricos variables. Esa es la base de la propagación de las ondas electromagnéticas, que lo hacen por el vacío sin ningún medio material que las sustente. Cuando se calculó la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas por el vacío se encontró que su valor coincidía con el medido de la velocidad de la luz. A partir de ese momento se tuvo la evidencia de que la luz está compuesta por ondas electromagnéticas. Más en detalle, la velocidad de la luz (c) depende de dos constantes denominadas permitividad eléctrica, ϵ_0 , y permeabilidad magnética, μ_0 , ambas cantidades referidas al vacío. Y se puede calcular con la fórmula:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$



James Clerk Maxwell, mostrado a la izquierda en un grabado de alrededor de 1860 durante una de sus investigaciones, fue uno de los más importantes físicos del siglo xx, gracias a su papel en el estudio de la luz, el magnetismo y las corrientes moleculares. Sus ecuaciones sobre el electromagnetismo supusieron una revolución en la física.

Que todos los observadores inerciales describan los procesos físicos con las mismas leyes es un requerimiento de sentido común: la física, al fin y al cabo, tiene que ser la misma para todos. El segundo punto establece que hay una velocidad especial en el universo, una velocidad que todo observador inercial mide con la misma magnitud independientemente de su propia velocidad. Esto supone una sorpresa porque en nuestra vida diaria las velocidades son siempre relativas al observador (por ejemplo, si vamos en nuestro coche a 100 km/h y nos cruzamos con otro que va a 50 km/h moviéndose en sentido contrario, para nosotros ese coche se desplaza a 150 km/h). Esta velocidad se demostró que era la de la luz en el vacío, definida con el valor exacto de 299 792 458 m/s.

Como ya se ha mencionado, Clerk Maxwell demostró que la luz es una onda electromagnética que se puede propagar por el vacío, es decir, que el vacío físico tiene características electromagnéticas que permiten la propagación de la luz y que fijan su velocidad. Se trata de uno de los primeros indicios de que el vacío es un estado físico con el que se puede interactuar y que, además, influye en el modo en el que otros sistemas se comportan.

Igualmente sorprendente resulta el hecho de que dicha velocidad sea la misma para todo observador inercial, lo que a su vez implica que todos los observadores de ese tipo, independientemente de sus velocidades relativas, describen el mismo vacío (y no solo en términos electromagnéticos).

En la relatividad especial las medidas de distancias o intervalos de tiempo no son absolutas como en la física newtoniana sino que son relativas al observador inercial que esté llevando a cabo las medidas de distancia o tiempo. Los intervalos temporales entre dos sucesos medidos por un observador que consideramos en reposo siempre serán más largos que los intervalos medidos por un observador en movimiento con respecto al primero; esto es lo que se conoce como *dilatación temporal*. Las distancias, por el contrario, se acortan. Todo esto se confabula para que, pase lo que pase, todos los observadores inerciales midan una misma velocidad de la luz en el vacío. La relatividad especial nos proporciona la receta para convertir las mediciones

de un observador en las de otro. De ese modo, aunque los valores que obtenemos en un experimento no tienen que coincidir con los que obtenga otro observador inercial que esté estudiando el mismo fenómeno, ambos somos capaces de traducir nuestro resultado al del otro. Son las llamadas *transformaciones de Poincaré-Lorentz*.

Así pues, conceptos como espacio y tiempo son relativos al observador, pero todos tienen que coincidir en la velocidad de la luz en el vacío. Ello obliga a considerar la combinación del espacio y el tiempo en una nueva entidad denominada *espacio-tiempo*. Desde el punto de vista matemático, el *espacio-tiempo* es un espacio vectorial de cuatro dimensiones —una dimensión temporal y tres espaciales— que tiene un objeto que no varía para ningún observador inercial, la métrica. Esta métrica es el objeto matemático que nos permite medir tiempos, distancias, áreas y volúmenes.

La relatividad general dicta que espacio y tiempo dejan de ser entidades absolutas para influir y ser influenciadas por el resto de campos físicos en función de cómo distribuyan sus energías y los flujos de las mismas.

EL VACÍO CUÁNTICO

La mecánica cuántica es una teoría física tan difícil de entender como de explicar. Se afirma incluso que no hay nadie capaz de comprenderla, y que permite fenómenos que escapan a toda experiencia. De hecho, existe una diferencia tan grande entre los comportamientos cotidianos a nuestra escala y los típicamente cuánticos que somos incapaces de plasmarlos en forma de imágenes y ejemplos. Decimos no entender la teoría cuando lo que queremos decir es que no sabemos imaginarla. A pesar de todo, no estamos tan indefensos ante la mecánica cuántica como pueda parecer. No solo se usa a diario en la fabricación de, por ejemplo, los punteros láser, los hornos microondas o los teléfonos móviles, sino que la materia y su estabilidad solo se entienden gracias a ella.

En la física de nuestro día a día, la física clásica —es decir, la newtoniana—, todas las magnitudes físicas susceptibles de ser medidas tienen valores definidos. Puede que no se conozcan o que sea más o menos difícil determinarlos experimentalmente, pero desde el punto de vista teórico todas ellas tienen un valor en cada instante de tiempo, aunque dicho valor pueda ir evolucionando. Imaginemos, por ejemplo, una partícula: dicha partícula tendrá, en cada instante, una posición, una velocidad, una aceleración, un momento —el producto de su masa por su velocidad, *grosso modo*—, etc. Si se quisiera describirla, bastaría con proporcionar una lista con los valores medidos de cada una de las magnitudes observables asociadas a la partícula. A esto le llamaríamos determinar el estado de una partícula.

La física cuántica difiere enormemente de esta visión. En los sistemas cuánticos hay que distinguir entre estados y observables, cosa que es totalmente irrelevante en la física clásica porque determinar un estado es, precisamente, dar el valor de todos los observables. En cuántica la cosa se complica: por un lado, se tienen los estados físicos que se supone contienen toda la información relativa al sistema bajo estudio; por otro, se tienen los observables, esto es, las cosas que es posible medir físicamente y que actúan sobre los estados cuánticos. En cuántica, a diferencia del paradigma clásico, un sistema puede que no tenga un valor definido para el valor de una magnitud física. La cuántica acepta que el sistema pueda estar en un estado superpuesto de estados que, desde la perspectiva clásica, serían mutuamente excluyentes. Por ejemplo, se puede tener una partícula que, al ser descrita, muestre una superposición de dos, tres, o más posiciones en el espacio. Al describir el estado conjunto, la cuántica dice qué posiciones es posible obtener si se mide tal cantidad y con qué probabilidad se obtiene una posición u otra. Es decir, en la cuántica se deben dejar de lado las certezas para dar entrada a las posibilidades y sus probabilidades asociadas.

Esto no significa que en cuántica todo esté permitido. Lo que realmente quiere decir es que, analizada en sus niveles más básicos, la naturaleza «acepta» posibilidades que a nuestra es-

cala son totalmente incompatibles, como estar en distintas posiciones o tener diferentes energías.

Esta indeterminación de los observables sigue unas reglas precisas, expresadas en el bautizado de forma muy apta como *principio de indeterminación* de Heisenberg. El principio de indeterminación es un elemento esencial de la mecánica cuántica, y uno de los elementos que más confusión generan cuando nos acercamos a ella. Lo primero que debe saberse es que el principio en cuestión es un teorema dentro de la mecánica cuántica. Esto es importante porque los teoremas son ciertos dentro de su esquema conceptual, así que el principio de indeterminación es una verdad absoluta en tanto en cuanto la cuántica siga siendo una teoría válida desde el punto de vista experimental.

El universo no es solo más extraño de lo que pensamos, es también más extraño de lo que podemos pensar.

WERNER HEISENBERG

El principio afirma que los sistemas físicos regidos por la cuántica no tienen determinados simultáneamente todos los valores de los posibles observables físicos, lo cual, recordemos, constituye una diferencia crítica respecto de la física clásica, en la que un sistema, en principio, puede ser descrito por la lista de los valores de todas las magnitudes observables del mismo, es decir, que estas están todas definidas a un tiempo.

El principio de indeterminación, más en concreto, establece que hay ciertos pares de magnitudes que no están definidos simultáneamente en un sistema. El par más famoso es el formado por la posición y el momento. Las magnitudes que forman un par donde opera la indeterminación, como la posición y el momento, se denominan *observables conjugados*. Es necesario apuntar, e insistir en este punto, que este principio es independiente de toda habilidad experimental. Aunque se pudieran hacer experimentos ideales perfectos, la indeterminación cuántica seguiría existiendo: si se determina el valor de un miembro del par conjugado el otro quedará totalmente indeterminado.

La energía, E , y el tiempo, t , son observables conjugados y, por tanto, están sujetos a la tiranía del principio de indeterminación. Cuando se efectúa la medida de la energía de un sistema siempre

EL PRINCIPIO DE INDETERMINACIÓN

El principio de indeterminación, llamado también relación de indeterminación o principio de incertidumbre, fue enunciado en 1925 por el físico alemán Werner Heisenberg, convirtiéndose muy pronto en una contribución esencial para el avance de la mecánica cuántica. Expresado de forma sencilla, el principio de indeterminación de Heisenberg señala que no se pueden medir simultáneamente y con precisión la posición y el momento lineal de una partícula. Dicha idea, por la cual Heisenberg recibió el premio Nobel de Física en 1932, tiene su origen en la no conmutatividad de la aplicación de algunos pares de observables físicos sobre los estados cuánticos. En cuántica las magnitudes observables se representan por objetos matemáticos denominados operadores, por ejemplo A y B . La aplicación de estos operadores sobre un estado cuántico para extraer la información relativa al observable al que representen puede que no conmute. Para saber si dos operadores conmutan o no tenemos a nuestra disposición una operación entre estos objetos, el conmutador, que se aplica del siguiente modo:

$$[A, B] = AB - BA$$

Cuando los pares observables no conmutan

Si el conmutador es nulo significa que podremos determinar simultáneamente el valor de ambos observables. Si por el contrario el conmutador es distinto de cero, ambos observables no pueden ser definidos simultáneamente. Por ejemplo, en física clásica podemos medir la posición de una partícula y luego su momento o viceversa; en ambos casos los resultados serán iguales para esas magnitudes, cosa que no ocurre en cuántica, y eso es lo que significa que determinados pares de observables no conmuten.

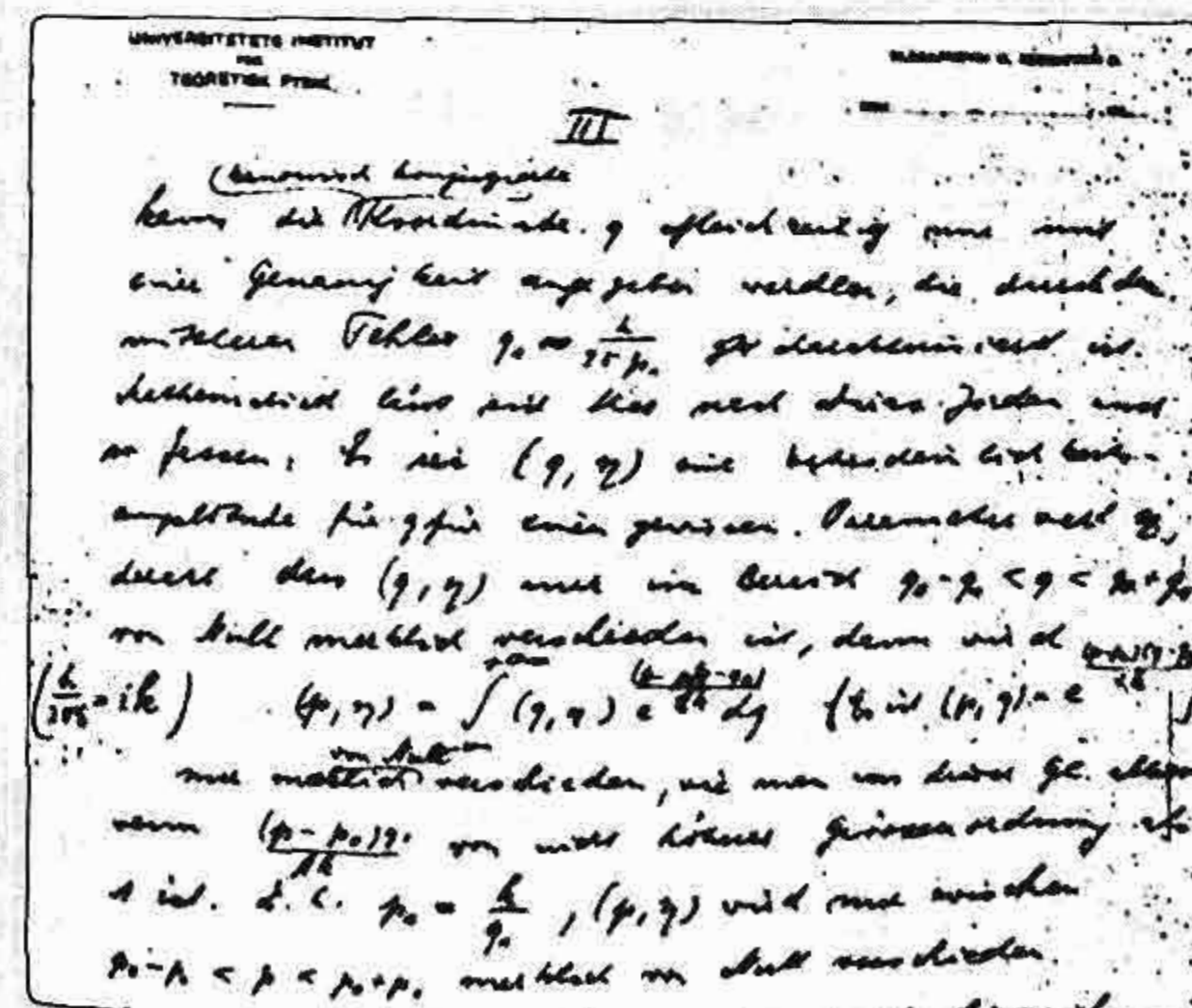
Indeterminación y conmutador

El teorema del principio de indeterminación establece que el producto de la indeterminación en el valor del observable A , ΔA , y el observable B , ΔB , depende del valor de su conmutador $[A, B]$ según la siguiente fórmula:

$$\Delta A \Delta B \geq \frac{1}{2} |\langle [A, B] \rangle|$$

donde el símbolo $\langle \dots \rangle$ indica el valor esperado en la medición de la actuación de los observables de su interior. Si ponemos $[A, B]$, $\langle [A, B] \rangle$ indica la diferencia que obtendríamos al efectuar una medida de B y luego A (AB) respecto al resultado de aplicar A y luego B (BA), sobre un determinado estado cuántico. Si A y B no conmutan, el corchete es distinto de cero y su diferencia tendrá un valor esperado no nulo. Las barras $|\dots|$ indican que se toma el valor numérico de su interior con signo positivo. El par posición, representado por el operador x , y el momento,

representado por el operador p (que tiene el significado de la masa por la velocidad del sistema en los casos más simples), tienen un conmutador dado por $[x, p] = i\hbar$, donde i indica que el resultado del conmutador se trata de un complejo y \hbar es la llamada constante de Planck reducida o de Dirac. Por lo tanto, el producto de las indeterminaciones de sus valores al intentar medirlos simultáneamente en un sistema tiene que satisfacer $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$.



El nobel alemán Werner Heisenberg desempeñó una intensa labor educadora. Fue profesor de física en la Universidad de Leipzig a partir de 1927, y también impartió clases en Berlín durante la guerra, mientras dirigía el proyecto de bomba atómica alemana. Tras la contienda estuvo en la Universidad de Gotinga y en la de Múnich hasta 1976, año en que falleció. A la izquierda, fragmento de una carta que Heisenberg escribió a Wolfgang Ernst Pauli y en la que se exponen las bases del principio de indeterminación. La misiva está datada el 23 de febrero de 1927.

transcurre un intervalo de tiempo Δt . Así, la indeterminación en la energía multiplicada por el intervalo de tiempo consumido en la medida de la misma ha de ser mayor que un determinado valor. Si se intenta reducir el tiempo de medida hasta 0 el desconocimiento en la energía del sistema aumenta mucho. No solo no se puede conocer la energía exacta de un sistema en un instante de tiempo, sino que si se quiere determinar exactamente la energía de un sistema se necesita un tiempo infinito.

Este hecho introduce la posibilidad de que un sistema no tenga una energía definida en todo instante y sufra fluctuaciones en las que la energía aumente o disminuya respecto de lo esperado, siempre y cuando ocurran lo suficientemente rápido como para que no puedan ser medidas de forma directa. Las consecuencias de todo ello a la hora de caracterizar el vacío serán, como veremos, importantísimas.

¿Campos vacíos?

Hasta ahora se ha hablado de dos de los marcos conceptuales esenciales de la física. Cualquier teoría que intente describir fenómenos básicos de la naturaleza concernientes a la estructura íntima de la materia o las propiedades de las interacciones físicas ha de ser consistente con los principios de la relatividad y de la mecánica cuántica. A día de hoy, existe un marco de trabajo maravilloso donde se respetan tanto los principios de la relatividad especial como los de la teoría cuántica. Al constructo resultante se le denomina teoría cuántica de campos. Pero ¿qué es un campo?

En física y matemáticas se habla de un campo cuando se dispone de una magnitud definida en cada punto del espacio. Por ejemplo, si fuera posible determinar la temperatura de cada punto de una habitación se tendría definido el campo de temperatura de esta. Ejemplos hay muchos otros: si se asignara una flecha indicando la magnitud de la velocidad del aire en la habitación junto a su dirección y sentido se obtendría el campo de velocidades del aire en ella. Por tanto, si un campo es una asignación de una magnitud, ya sea en módulo, dirección, sentido o cualquier otra, en

cada punto del espacio, un campo electromagnético también es la asignación de una determinada magnitud al espacio. En este sentido, la física se ocupa de estudiar cómo evolucionan los campos, cómo interactúan, cómo se generan y cómo se detectan.

Al introducir la cuántica en el estudio de los campos surgen cosas sorprendentes. La cuántica afirma que asociados a todo campo hay un conjunto de partículas en un continuo proceso de creación y destrucción. La relatividad obliga a que dichas «excitaciones» del campo tengan asociada una magnitud denominada *masa* y otra magnitud denominada *espín*, que es la que controla la capacidad de la partícula para interactuar directamente con el campo magnético. Es importante insistir en que dado un campo existirá una partícula asociada al mismo que tendrá a su vez asociados una masa, un espín y distintas cargas. Esto se verifica para todos los campos físicos estudiados por la cuántica. Si se toma como ejemplo el campo electromagnético, la partícula asociada será aquella que se denomina fotón.

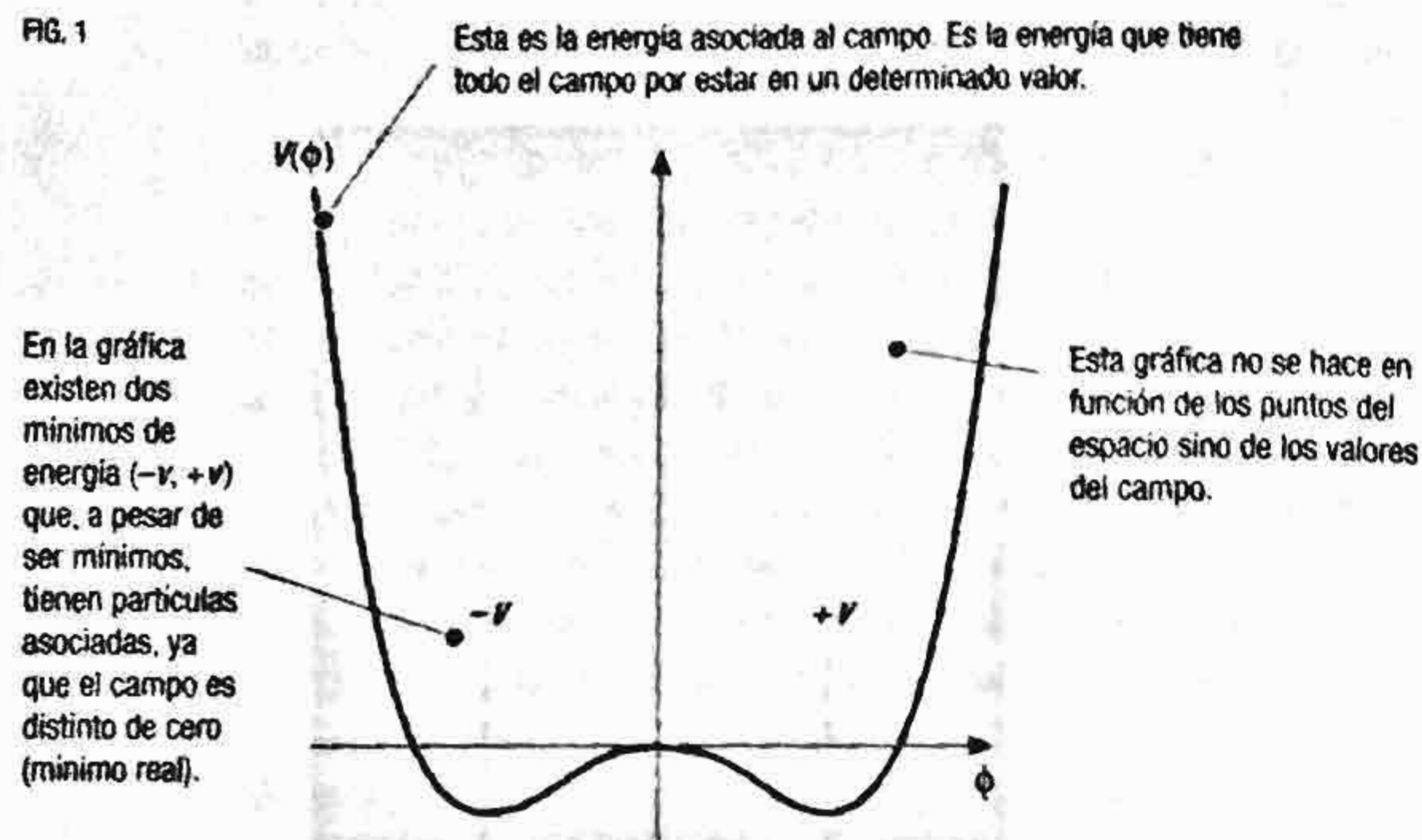
Otra magnitud que debe tenerse en cuenta es la energía potencial del campo, o simplemente potencial, que es una medida de la energía contenida en el campo en función del valor que este tome (figura 1).

Resumiendo:

- Los campos físicos tienen asociadas unas partículas con unas características intrínsecas que las identifican como excitaciones de un campo concreto.
- Los campos tienen una energía asociada que depende del valor que tome dicho campo.
- Un campo vendrá descrito por un número de partículas que, según la cuántica, pueden aparecer y desaparecer en un continuo proceso de evolución temporal.

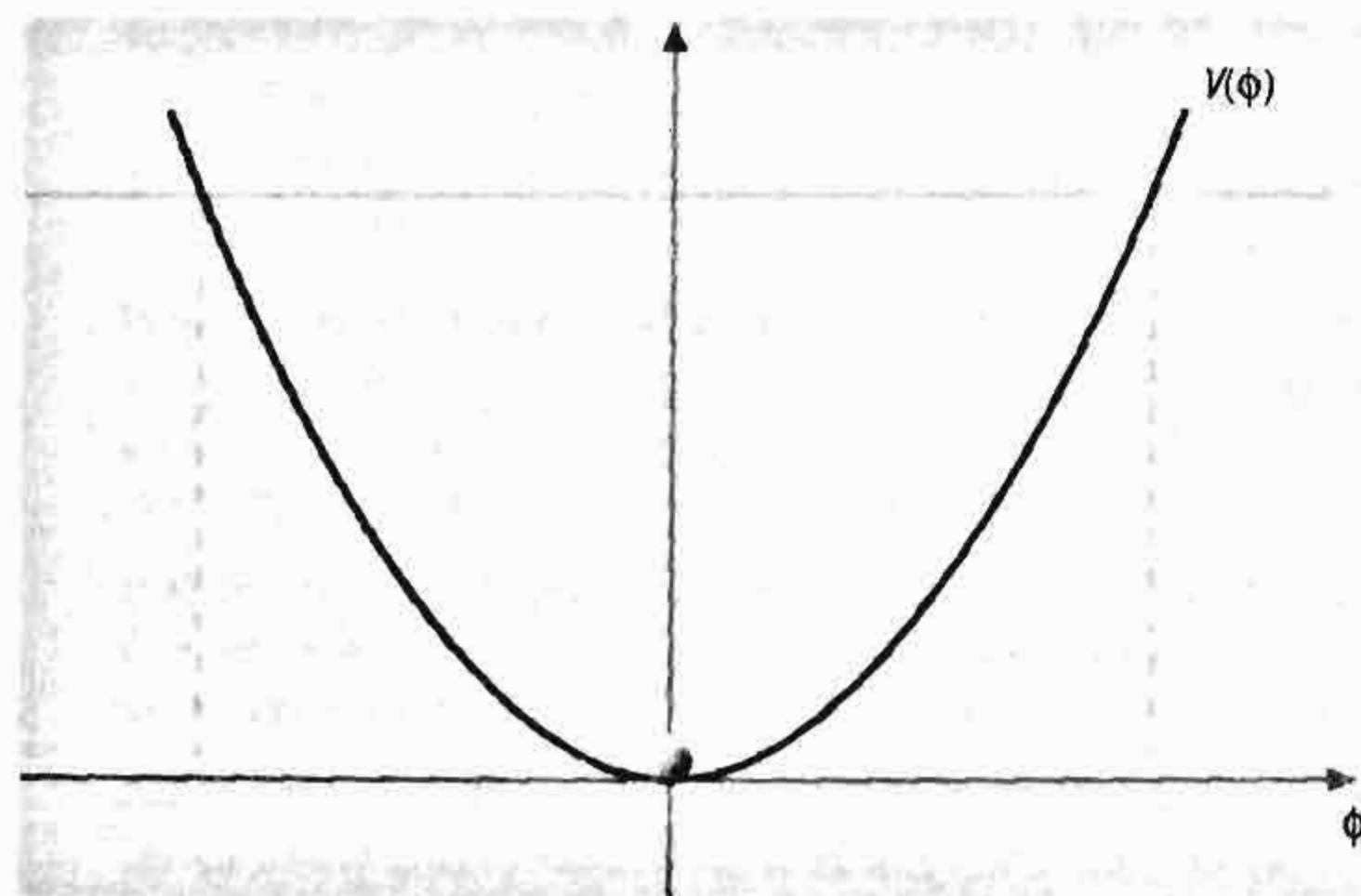
Todo ello ha sido comprobado experimentalmente hasta un grado increíble de precisión.

FIG. 1



En esta figura se observa la energía contenida en el campo ϕ dada por $V(\phi)$. En la gráfica solo se representa la energía que tiene un campo en una región en la que tenga el valor ϕ . Se puede observar que no se hace referencia a valores espaciales. Es decir, la gráfica solo comunica la energía del campo cuando tiene un determinado valor, y ese valor lo puede tomar en un punto, en una región, o en todo el espacio disponible.

FIG. 2



El valor que toma el campo y la energía que tiene son representados por el punto grueso. A la vista de esta gráfica se puede decir que el campo está en su valor de energía mínima en el punto que el campo vale cero, que *grosso modo* es donde el campo no tiene partículas asociadas.

¿Qué es el vacío en este contexto? Para responder a esta pregunta es necesario profundizar en una característica descollante del universo con relación a la energía. Se sabe que los sistemas tienden a estar en su estado de mínima energía: por ejemplo, si soltamos un lápiz desde una ventana, este caerá atraído por la gravedad porque es una situación más favorable energéticamente estar en el suelo que estar a una determinada altura. Se podría decir que la naturaleza tiene cierta «tendencia a la vagancia» y siempre procura estar en el mínimo de energía.

Por otro lado, todo sistema físico, como un campo, tiene que tener un mínimo de energía; de no existir tal mínimo se podría extraer energía indefinidamente yendo cada vez a valores más y más pequeños. De hecho, eso sucedería a nuestro alrededor de manera espontánea, ¡veríamos surgir por doquier una cantidad infinita de energía! Ni que decir tiene que eso no ocurre y que si sucediese nadie estaría aquí para contarlos. La idea que hay que tener presente es que todo campo tiene un mínimo de energía (al menos uno). A ese estado de mínima energía se lo denomina estado vacío.

Pero claro, cuánticamente, hay partículas asociadas al campo, y por lo tanto, se podría decir que el estado vacío del campo en cuestión es aquel que no contiene ninguna de sus partículas asociadas.

En el caso de campos como el electromagnético o el de la interacción fuerte o débil, estos dos conceptos son el mismo: el estado de mínima energía es aquel que no contiene partículas asociadas a los campos (figura 2).

Puede ocurrir, y de hecho ocurre, que haya sistemas en los que el estado sin partículas asociadas no sea el de mínima energía. Dichos campos son los que tienen perfiles de energía como los de la figura 1. En estos casos se presentan dos nociones de vacío que no coinciden: si el campo está en su mínimo de energía hay partículas presentes, y si el campo no tiene partículas presentes no está en el mínimo de energía. Así que ambos tienen nombres diferentes: llamamos vacío real al estado de mínima energía de un sistema, y falso vacío al estado sin partículas.

Estas son las herramientas del físico contemporáneo para abordar el tema del vacío y profundizar en él.

Las manifestaciones del vacío

El vacío cuántico es un estado de los sistemas físicos con el que se puede interactuar. En la ciencia actual, el vacío se ha hecho esencial para entender cuestiones que abarcan desde la estructura atómica más fina hasta la masa de las partículas que componen todo lo que nos rodea y a nosotros mismos.

El vacío es un estado físico de los sistemas que está asociado a la mínima energía que estos pueden tener. Desde el punto de vista de la mecánica cuántica, el vacío no está vacío, sino que contiene ondas que surgen al azar. Estas ondas tienen características de partículas, de manera que podemos entender el vacío cuántico como un mar de partículas que se crean y aniquilan rápidamente. Las fluctuaciones del vacío se entienden gracias al principio de indeterminación de Heisenberg. Ya hemos visto que este principio impone un límite en la precisión con que podemos medir simultáneamente dos observables cuyo conmutador es diferente de cero. Además, existe una relación de indeterminación entre el valor de la energía de un sistema y el tiempo que se tarda en medirla; por lo tanto, un campo no puede tener una energía fija en cualquier instante de tiempo. En consecuencia, en el vacío los campos no pueden tener en todo instante la misma energía, sino que esta se encuentra en continua variación, las fluctuaciones. Frente a ello, los científicos se preguntan: ¿se puede experimentar con el vacío?; ¿es posible saber si de verdad esas fluctuaciones están ahí?; ¿se puede demostrar experimentalmente su existencia?

En el marco de la mecánica cuántica el vacío se comporta, pues, de una forma compleja, ya que en su seno aparecen y desaparecen distintos tipos de partículas. Cuanto mayor es la energía de las partículas que aparecen, menor es el tiempo durante el cual pueden existir antes de ser reabsorbidas. El problema surge al intentar determinar si esa imagen es correcta o no. En principio, las fluctuaciones del vacío son tales que no son detectables directamente, el vacío es el estado de mínima energía y eso es lo que se encuentra al medirlo: el mínimo de energía. Afortunadamente, la física proporciona métodos indirectos para tener constancia de la estructura del vacío. Con el paulatino desarrollo de la física se fueron encontrando distintos fenómenos, la mayoría contrastados experimentalmente, cuyo origen depende del vacío y de sus fluctuaciones, lo que aportó verosimilitud a su existencia. Hay tres fenómenos principales que se explican gracias a la existencia del vacío: el efecto Lamb, el efecto Casimir y el efecto Schwinger.

EL EFECTO LAMB

En su definición más simple, un átomo está formado por un núcleo —compuesto por protones y neutrones, y unidos por la fuerza nuclear fuerte— y por electrones que pululan a su alrededor. Debido a la fuerza electromagnética, que atrae cargas opuestas, y dado que los protones tienen carga eléctrica positiva, los neutrones son neutros, y los electrones tienen carga eléctrica negativa, se pueden formar estados ligados en los que los electrones y los núcleos forman una entidad: el átomo.

La gran contribución del físico estadounidense Willis Lamb (1931-2008) a la física fue el descubrimiento de un efecto asociado al vacío cuántico y que permitió, junto a la mecánica cuántica, una descripción precisa del átomo de hidrógeno. En honor a él, hoy en día este efecto es conocido como el *efecto Lamb*. Para entender exactamente en qué consiste, haremos un salto al pasado, a principios del siglo xx, cuando el físico Ernest Rutherford propuso su modelo atómico que describía la estructura del átomo y la comparaba con un sistema planetario

en miniatura donde el núcleo jugaba el papel del Sol y los electrones los de los planetas orbitando a su alrededor. La imagen propuesta por Rutherford es muy sugestiva, pero resultó ser falsa por dos motivos. En primer lugar, el electromagnetismo nos enseña que una carga eléctrica acelerada tiene que emitir radiación electromagnética. Dado que los electrones son cargas, si estos estuvieran describiendo órbitas circulares o elípticas alrededor del núcleo estarían sometidos a una aceleración continua producida por la fuerza de atracción núcleo-electrón, y por lo tanto emitirían continuamente ondas electromagnéticas. Las ondas (o radiación electromagnética) tienen energía, y como la energía total debe conservarse, esto implicaría una disminución de la energía de atracción núcleo-electrón y eso ocasionaría que el electrón se fuera acercando cada vez más al núcleo. Es decir, el electrón describiría una espiral dirigida hacia el núcleo y lo haría en un tiempo despreciable a escala humana. Así, pues, este modelo tan sugestivo y simple predice que los átomos acabarían deshaciéndose rápidamente tras su formación, algo que es evidente que no es cierto porque de ser así la materia no se mantendría por mucho tiempo, lo cual va en contra de toda evidencia empírica cotidiana.

Por otro lado, el principio de indeterminación de Heisenberg establece la prohibición de que ciertos pares de magnitudes físicas estén definidos simultáneamente en los sistemas; uno de esos pares son la posición y la velocidad de una partícula. Si se conoce con precisión uno de ellos el otro, necesariamente, estará indeterminado. Este hecho imposibilita la tarea de definir órbitas, ya que para concretar los caminos que sigue una partícula necesitamos conocer la posición en la que se encuentra y su velocidad, para saber en qué sentido y cómo de rápido cambia de posición, en cada instante. Así que la física cuántica obliga a prescindir también del concepto de órbita y, por tanto, del modelo de Rutherford.

Ante tal situación, se podría pensar que la cuántica no permite definir con claridad la estructura del átomo, pero en realidad es lo contrario: la cuántica ha hecho posible explicar la estructura atómica bajo niveles de precisión asombrosos. Desde el punto

de vista cuántico no se puede describir el movimiento del electrón alrededor del núcleo en términos de trayectorias pero sí se puede tratar el electrón como una onda. Así, se tendrá una expresión matemática —una función de onda— que describirá el electrón en el átomo, y se podrá asignar a cada función de onda su correspondiente energía. Y eso es todo lo que se necesitará para hacer física atómica y química.

Actualmente un átomo se describe por las distintas energías que pueden tener sus electrones. La cuántica mostró que los electrones no pueden tener cualquier energía sino solo unos determinados valores denominados *niveles de energía*. Surge así el *estado fundamental*, que es aquel estado de mínima energía del sistema núcleo-electrón, y los *estados excitados*, aquellos estados con una energía mayor. Cada átomo, dependiendo del número de protones y electrones involucrados, tendrá unos niveles de energía característicos. Por ejemplo, todos los átomos de hidrógeno tienen el mismo esquema de niveles, todos los átomos de helio tienen su mismo esquema de niveles distinto del anterior, y así sucesivamente.

Concentrémonos un momento en el átomo más simple de todos, el átomo de hidrógeno, compuesto por un protón en su núcleo y un único electrón. Si se aplica la mecánica cuántica, y suponiendo que el electrón no tiene velocidades muy elevadas, es posible obviar los efectos de la relatividad especial y por tanto el átomo implicado queda descrito por una *ecuación de Schrödinger*. Esta ecuación se puede considerar como una versión cuántica de la segunda ley de Newton de la mecánica clásica, y sirve para describir la evolución temporal de los electrones dentro del átomo.

Al resolver la ecuación de Schrödinger para el átomo de hidrógeno se encuentra que los estados del electrón corresponden a sus niveles de energía, los cuales vienen descritos por una familia de *funciones de onda*. El cuadrado de estas funciones de onda nos da la probabilidad de encontrar al electrón a una determinada distancia del núcleo y en una determinada dirección en el espacio. Estas soluciones se identifican con cuatro números, los denominados *números cuánticos*, que se denotan por (n, l, m, s) .

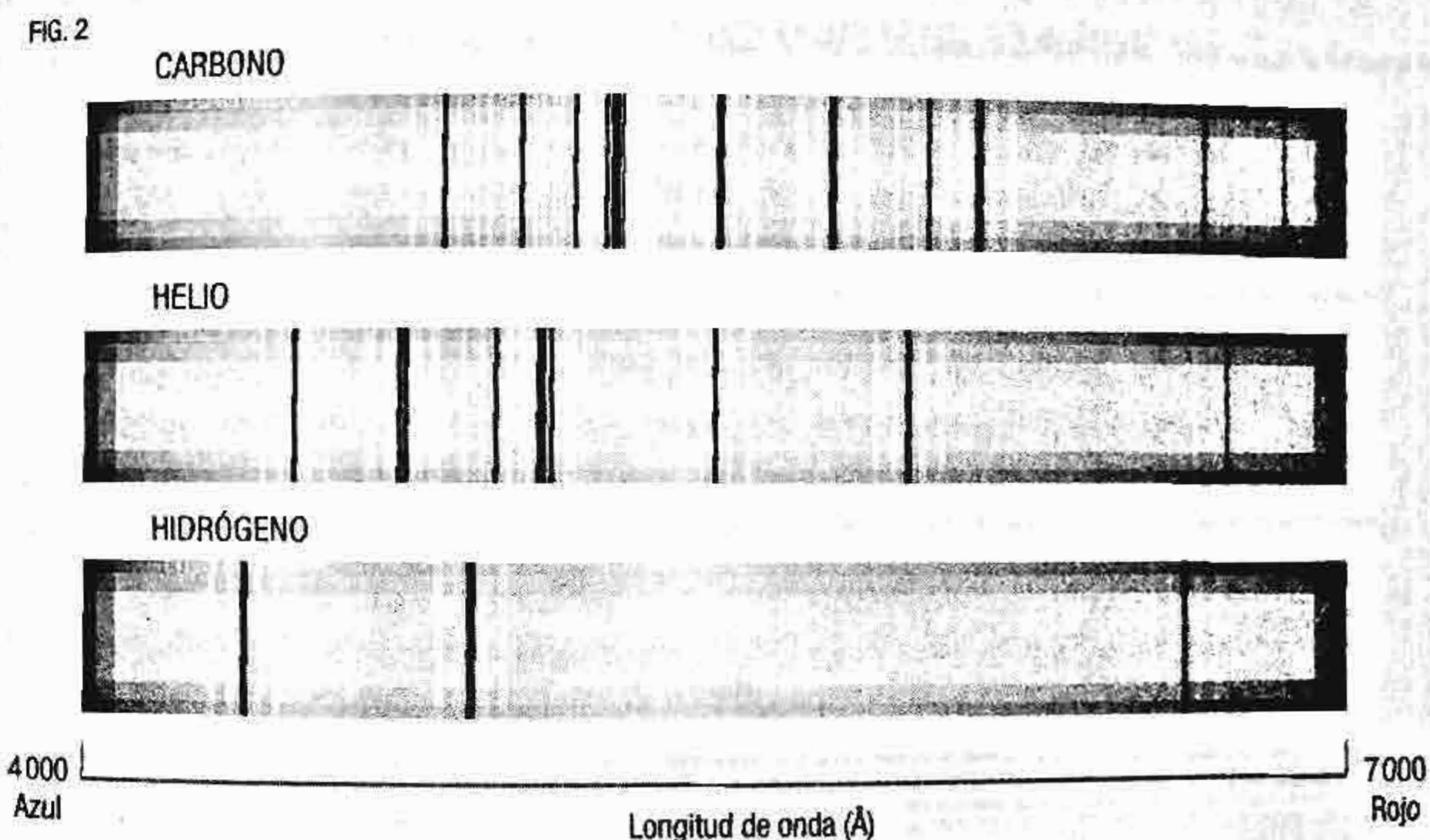
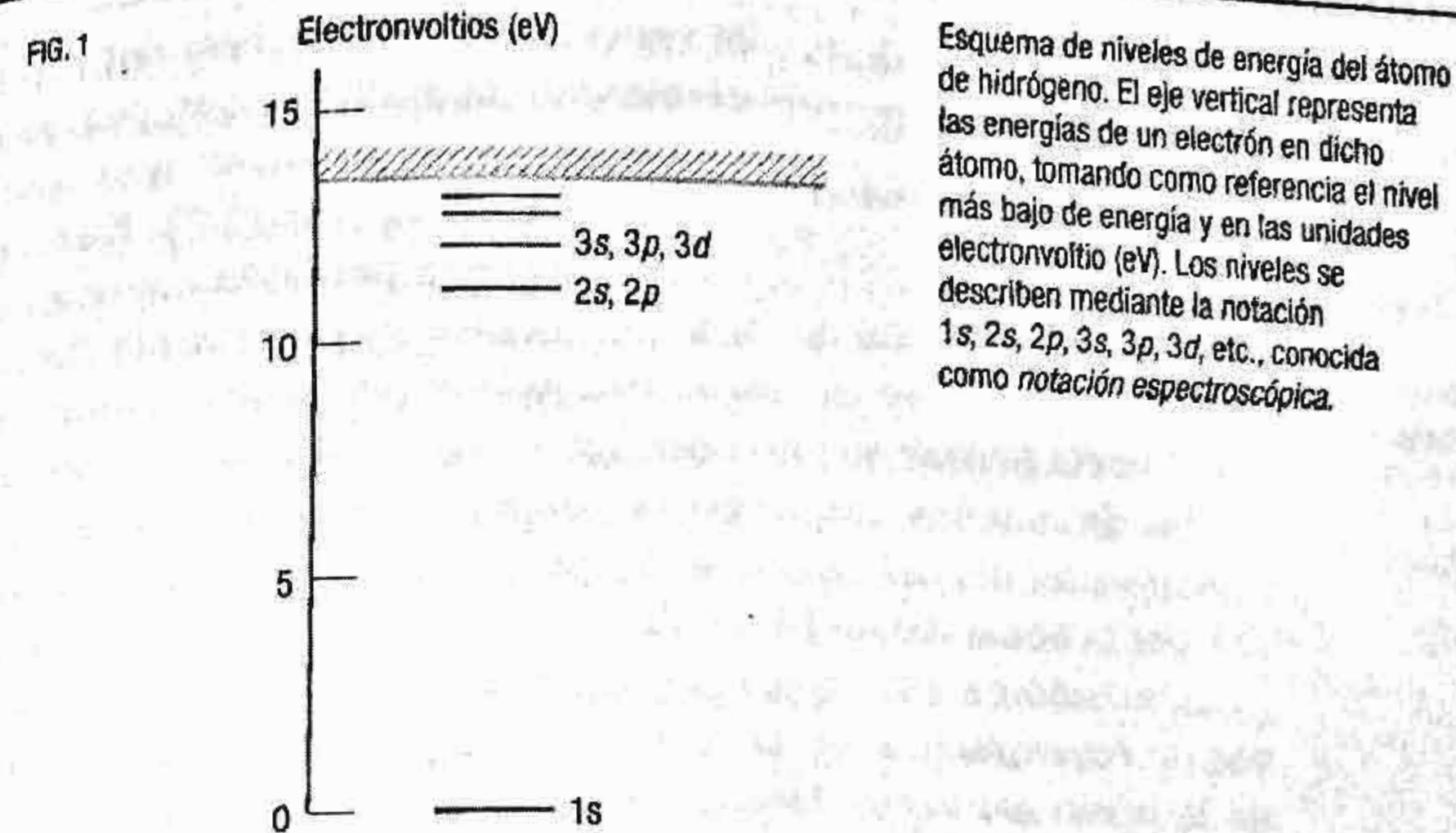
El número cuántico principal, n , identifica el nivel energético, es decir, el número de capa en el que se encuentra el electrón; l es el número cuántico secundario, y m es el número cuántico magnético, ambos nos indican cómo gira el electrón dentro del átomo (la energía que tiene debida a la rotación). Por último s representa el valor del espín del electrón, y nos indica en qué sentido gira el campo magnético producido por el electrón al voltear sobre su eje. Estos cuatro números que nos describen el electrón no pueden tomar cualquier valor, es decir, son números discretos. El número cuántico n puede ir desde 1 hasta infinito, l puede tomar valores desde 0 hasta $n-1$ y recibe nombres particulares ($l=0$ viene denominado por la letra s , $l=1$ por la letra p , $l=2$ por la letra d , etc.). Dicha notación se denomina *notación espectroscópica* y es la que aparece en la figura 1. El número cuántico m toma valores que recorren desde $-l$ hasta $+l$ en saltos de 1, y finalmente m_s siempre es $\pm 1/2$ en las unidades propias de la física atómica. Así pues, si se proporcionan estos cuatro números cuánticos, por ejemplo $(2, 1, -1, +1/2)$, se tiene perfectamente identificado el estado del electrón —a esos cuatro números les corresponde una función matemática, la función de onda—. A través de la ecuación de Schrödinger se constata que los niveles de energía vienen determinados exclusivamente por el número cuántico n .

Los electrones, como ya hemos indicado, tienen un valor de espín $\pm 1/2$ y, por tanto, son fermiones (partículas con un espín semiimpar, por ejemplo $1/2, 3/2, 5/2$). Existe un principio en la mecánica cuántica, el *principio de exclusión de Pauli*, según el cual dos fermiones no pueden ocupar el mismo estado cuántico, es decir, no pueden tener todos sus números cuánticos idénticos. Así, dos electrones de un átomo con los mismos números cuánticos no ocuparán un mismo lugar, sino que cuando un estado cuántico esté ocupado por un electrón, el siguiente electrón deberá ocupar otro estado diferente. Esta representación de la estructura de los electrones en un átomo —la distribución de los diferentes niveles energéticos— se denomina configuración electrónica (figura 1).

Lo maravilloso es que un electrón puede ir de un nivel inferior de energía a uno superior siempre y cuando absorba un fotón

que tenga exactamente la energía requerida para el salto entre los niveles, ni un poco más, ni un poco menos. Cuando pasa eso se dice que el electrón ha subido a un *estado excitado*. Pero si se tiene un conjunto de átomos de hidrógeno y se excita a sus electrones aplicándoles energía y luego se los deja reposar, estos tenderán a ir a estados de energía menores emitiendo en el proceso justamente los fotones que tengan la energía exacta del salto de bajada que hayan efectuado. Por lo tanto emitirán fotones de distintas energías, pero estas siempre pertenecerán a un conjunto determinado, aquellas que corresponden a los diferentes saltos de niveles del hidrógeno. En general, un átomo siempre emitirá los fotones con su particular conjunto de energías. Si se los detecta se verán líneas brillantes de distintos colores, que corresponden a distintas frecuencias (o longitudes de onda) electromagnéticas y por tanto a las diferentes energías de los fotones emitidos: es lo que se denomina *espectro* de un átomo. Como cada átomo tiene sus niveles distribuidos de distinta forma, los saltos son específicos de cada átomo y por tanto este presenta un espectro característico, su código de barras cuántico. En la figura 2 se indica la posición de las líneas del espectro del carbono, el helio y el hidrógeno en cierta parte visible del espectro electromagnético.

Según la ecuación de Schrödinger, dos electrones en estados orbitales con el mismo número cuántico principal n tienen idéntico valor energético, tal y como se observa en la figura 1 (por ejemplo los estados $2s$ y $2p$ tienen la misma energía). Sin embargo, disponemos de técnicas espectrales muy precisas que han permitido medir pequeñas discrepancias energéticas entre estos niveles. Esas diferencias se entienden a la perfección al introducir en el juego la relatividad especial. En lugar de usar la ecuación de Schrödinger se emplea la ecuación de Dirac para estudiar los átomos, que es la ecuación que tiene en cuenta tanto la cuántica como la relatividad especial. Al usar este otro modelo matemático se encuentra una impresionante correspondencia entre los resultados teóricos y los experimentales de los espectros atómicos. Pero allá por 1947 surgió un problema: Willis Lamb y Robert Retherford (1912-1981) encon-



Esquema de los espectros de absorción, de arriba abajo, del carbono, el helio y el hidrógeno. Las posiciones de las diferentes líneas vienen determinadas por las diferentes longitudes de onda de los fotones que el correspondiente átomo puede emitir al ser desexcitado. La energía de un fotón es proporcional a su frecuencia e inversamente proporcional a su longitud de onda, de manera que el espectro electromagnético puede describirse equivalentemente con cualquiera de estas tres magnitudes.

Tenemos que abandonar el sentido común con el fin de percibir lo que está sucediendo a nivel atómico.

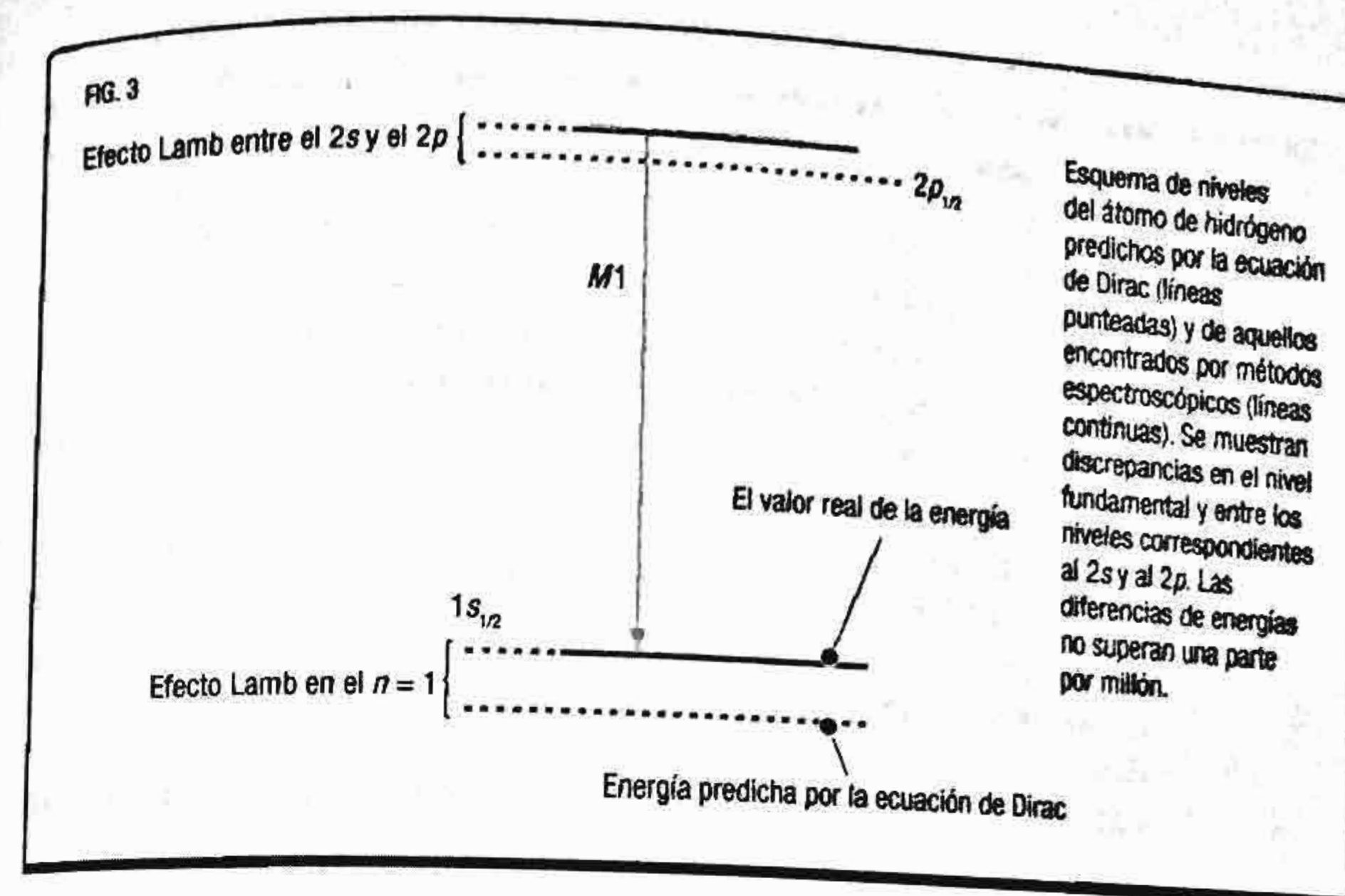
RICHARD FEYNMAN

dado que la ecuación de Dirac era la mejor herramienta disponible para entender la estructura atómica y la aportación de Lamb hacía pensar que no daba los resultados correctos en todas las situaciones. De hecho, también se observó que el estado fundamental del hidrógeno, el 1s, no estaba en la energía predicha por la ecuación de Dirac sino que era un poco más elevada.

La solución a esta aparente crisis entre la teoría y la observación experimental de la estructura más fina del átomo vino de la mano del vacío. Debido a las fluctuaciones del vacío, en cualquier punto del espacio aparecen y desaparecen pares de partículas en un tiempo que es inversamente proporcional a las energías de las partículas creadas. Estos pares de partículas tienen que tener una carga total neutra, ya que el vacío es neutro y la carga total se conserva. Esto implica que en el vacío se pueden crear pares partícula-antipartícula (partículas de cargas opuestas) o bien pares de fotones (los cuales son neutros). Pues bien, resulta que los electrones que están en los estados 1s y 2s tienen una alta probabilidad de estar cerca de su protón, pero en su camino se topan con las fluctuaciones, fundamentalmente fotones que los intentan separar del protón, y por tanto aumentan su energía. Por eso, los niveles 1s y 2s tienen más energía de la que se espera de ellos si no se tiene en cuenta el vacío. Este efecto bautizado como *efecto Lamb* fue uno de los pistoletazos de salida para el desarrollo de la teoría cuántica del electromagnetismo, la *electrodinámica cuántica*, una de las teorías mejor comprobadas y con mayor coincidencia teórico-experimental. Cuando en los cálculos se considera la contribución del vacío cuántico, se obtienen los mismos niveles de energía que se observan experimentalmente.

En otras palabras, el vacío tiene influencia en la estructura de nuestros átomos, y es una influencia que se puede medir.

traron una minúscula diferencia en el espectro del hidrógeno entre dos niveles, el 2s y el 2p, que según la teoría de Dirac tendrían que tener la misma energía (figura 3). Este hecho supuso una pequeña conmoción



EL EFECTO CASIMIR

En 1948 el físico holandés Hendrik Casimir puso sobre la mesa un efecto sorprendente y controvertido. El planteamiento es simple: al introducir dos placas metálicas paralelas separadas por una distancia minúscula en una región donde existe un vacío, estas sienten una fuerza atractiva (figura 4). La fuerza por unidad de área que sienten estas placas es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la distancia que las separa y viene dada por la siguiente expresión:

$$\frac{F}{A} = \frac{-\hbar c \pi^2}{240 d^4},$$

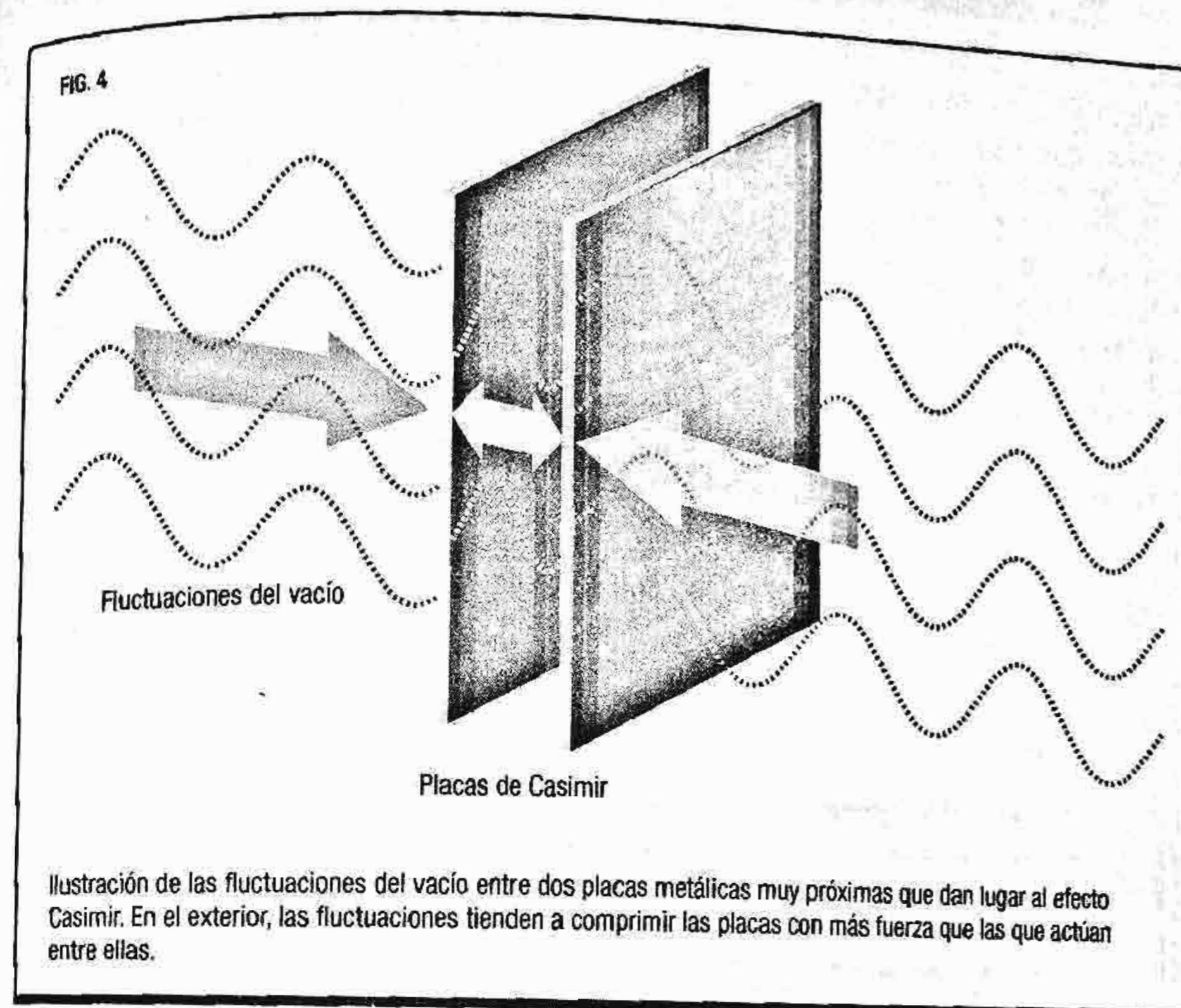
donde \hbar es la constante de Planck dividida por 2π , la que controla los fenómenos cuánticos, c es la velocidad de la luz en el vacío, y d , la distancia de separación entre las dos placas. El signo menos

indica que se trata de una fuerza de atracción, fuerza que se mide experimentalmente desde los trabajos del físico estadounidense Steve Lamoreaux en 1997.

La idea que subyace en el cálculo de esta fuerza es que la estructura del vacío, determinada por las fluctuaciones de los campos cuánticos, se ve modificada al introducir las placas metálicas conductoras. En este caso estamos centrados en el vacío del campo electromagnético, donde los fotones aparecen y desaparecen constantemente. Desde el punto de vista cuántico los fotones tienen asociada una longitud de onda que determina su energía: a menor longitud de onda, mayor energía, y a mayor longitud de onda, menor energía. Los metales se comportan como espejos para los fotones, así que cuando se crean estas fluctuaciones entre las placas metálicas hay fotones rebotando entre ellas continuamente. Pero esta interacción entre las fluctuaciones y las placas metálicas impone una restricción sobre las longitudes de onda de los fotones que se pueden crear en el vacío existente entre las placas. De hecho, entre ellas solo se pueden dar fluctuaciones cuya longitud de onda quepa de forma entera dentro de la distancia entre las dos placas. Si no cabe un número de veces entero la longitud de onda de una fluctuación entonces no puede aparecer entre las placas. Eso es importante porque entre las placas aparecen «menos» fluctuaciones que fuera de las mismas, donde las longitudes de onda de los fotones que aparecen y desaparecen no están restringidas por nada.

De forma inmediata puede pensarse que dado que las fluctuaciones tienen energía (mientras están existiendo, antes de reabsorberse en el vacío), fuera de las placas habrá más fluctuaciones empujándolas que entre ellas. Por lo tanto es lógico suponer que existe una fuerza que intenta unir las placas. A esa fuerza se la ha bautizado como la *fuerza de Casimir*.

No obstante, la cuestión es un poco más complicada que la imagen simplificada que se ha dado. Cuando se intenta calcular la energía que hay entre las placas debida a las fluctuaciones del vacío, y también la que hay fuera de ellas, surge una molesta respuesta: en ambos casos se obtiene que la energía es infinita.



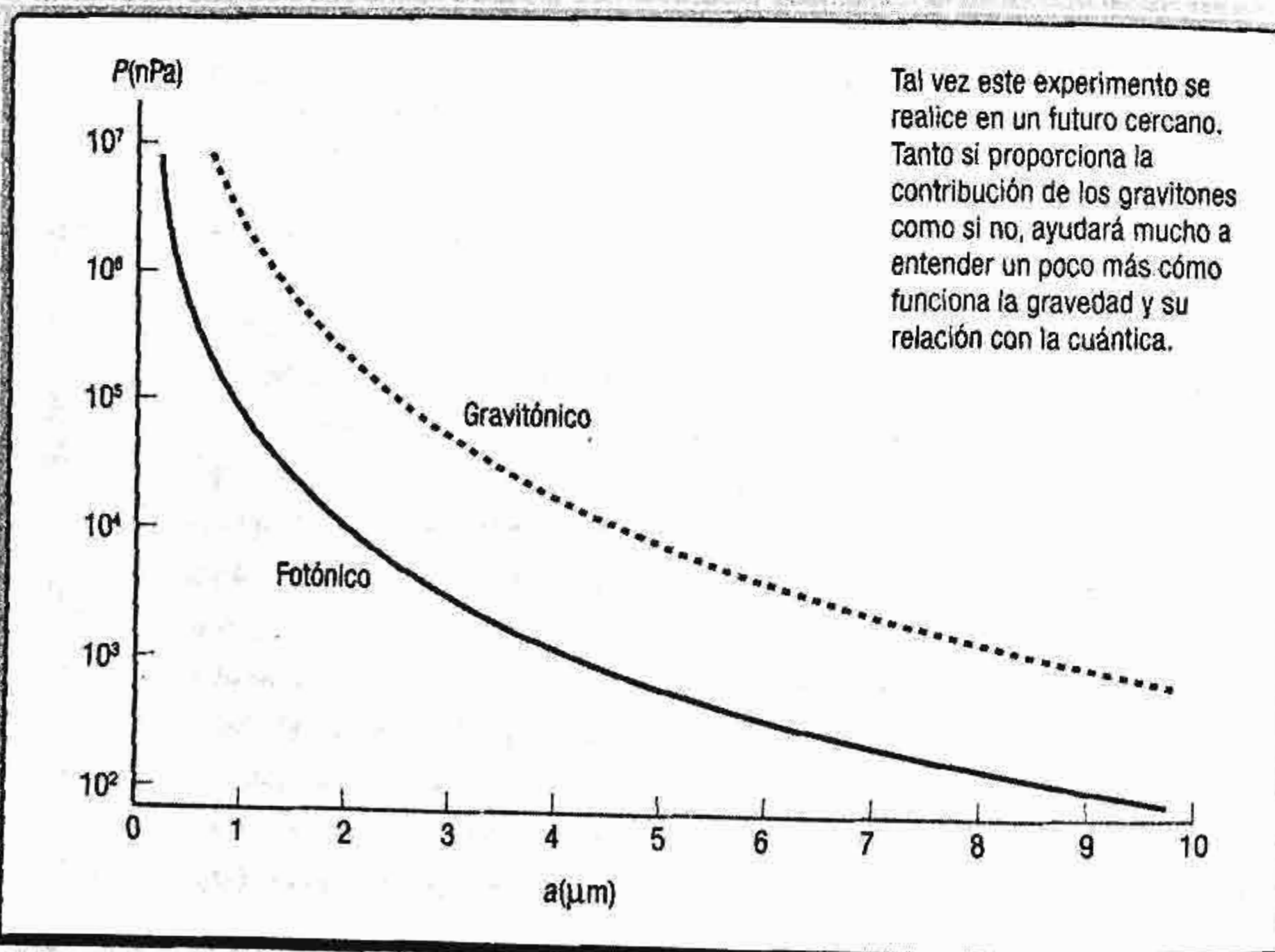
Cuando un cálculo en física arroja un resultado infinito puede ser por tres motivos distintos: o bien se ha cometido un error en el propio cálculo, o se está aplicando una teoría que no puede dar cuenta de los fenómenos que se quieren estudiar, o, por último, puede que la teoría sea la acertada y los cálculos sean correctos en cuyo caso los infinitos pueden estar informando de la estructura más íntima del proceso. Este último supuesto sería el caso cuando se aplica la *teoría cuántica de campos* a diferentes fenómenos físicos. En particular, el infinito que surge al calcular la energía del vacío nos está indicando la cantidad infinita de fluctuaciones que hay en el espacio. No obstante, esto no nos impide extraer resultados que podamos medir, como la fuerza de Casimir, ya que lo que observamos en los experimentos siempre va a depender de la diferencia de

EFFECTO CASIMIR GRAVITATORIO

Recientemente se ha propuesto utilizar el efecto Casimir para la detección de gravitones. Los gravitones son las partículas cuánticas encargadas de mediar la interacción gravitatoria del mismo modo que los fotones son los mensajeros del electromagnetismo. Hasta la fecha no hay ninguna evidencia experimental de la existencia de los gravitones, así que la búsqueda de los mismos es un atractivo e interesante campo de investigación que abriría la puerta a dar alguna respuesta a la cuestión de la *gravedad cuántica*.

Gravitones y fotones

La idea subyacente es que además de las fluctuaciones del vacío en forma de fotones, al considerar el vacío gravitatorio, también podrían aparecer fluctuaciones en forma de gravitones. Si este fuera el caso sería posible usar ciertos materiales para las placas del experimento que las hicieran sensibles a estos gravitones. De esta manera, la fuerza entre las placas podría ser mayor que la calculada por Casimir, quien solo consideró fotones como fluctuaciones. Como se ve en la gráfica, donde se representa, para un cierto material, la fuerza por unidad de área (presión P) en función de la distancia entre las placas, denotada por a , la contribución de los gravitones sería mayor que la de los fotones. Esto podría servir para demostrar la existencia de estas partículas tan buscadas.



energías, y no solo del mínimo de energía. Los procesos que se han desarrollado para lidiar con estos infinitos y extraer respuestas con significado físico se denominan *regularización y renormalización*.

La regularización es un método que transforma cantidades infinitas en finitas con la introducción de un nuevo parámetro, llamado *regularizador*. De esta manera, el cálculo de una cantidad física, como puede ser la energía del vacío entre dos placas metálicas, solo da infinito para un cierto valor de este parámetro. La renormalización consiste en una serie de técnicas que, una vez la teoría ha sido regularizada, relacionan la cantidad física que se quiere calcular con las magnitudes físicas relevantes en el experimento, deshaciéndose así del *regularizador*. El desarrollo de los métodos de la regularización y la renormalización durante las últimas décadas ha sido clave para entender cómo se comporta nuestro universo en sus niveles más básicos. Hoy día, la teoría cuántica de campos en sus distintas aplicaciones proporciona resultados físicos con una correspondencia asombrosa entre los cálculos teóricos y los resultados experimentales.

EL EFECTO SCHWINGER

Hasta ahora solo se han comentado fenómenos en los cuales se puede intuir la presencia de fluctuaciones pero no observarlas directamente. Un nuevo efecto, el *efecto Schwinger*, se ocupa justamente de este asunto, hacer que las fluctuaciones no se reabsorban en el vacío y pasen a una existencia que pueda ser medida por los aparatos.

El efecto fue formulado por Julian Schwinger en 1951, basándose en unos trabajos previos de Heisenberg y de uno de sus alumnos, Hans Euler, realizados en 1931. La idea, como suele pasar en física, es muy simple. En el vacío se forman fluctuaciones en forma de fotones pero también de otras partículas, por ejemplo electrones. Pero el vacío es eléctricamente neutro, así que, si una fluctuación crea un electrón, también debe de crear

EFFECTO SCHWINGER Y DIAGRAMAS DE FEYNMAN DEL VACÍO

En teoría cuántica de campos existe una magnífica herramienta que convierte expresiones matemáticas en dibujos, son los llamados diagramas de Feynman. Ideados por el físico estadounidense Richard Feynman, este los empezó a utilizar a partir de 1948, con objeto de representar trayectorias de partículas, mostrándolas durante las fases intermedias de un proceso cuántico. Aunque se pueden utilizar en otros ámbitos de la física, son particularmente útiles en el de la física cuántica. Así, cuando se pretende describir un proceso físico entre partículas cuánticas la teoría dice que este se puede llevar a cabo de diferentes formas. Por ejemplo, en la repulsión de dos electrones puede ocurrir que intercambien un fotón, o dos, o que en el proceso uno de esos fotones se descomponga en un par de otras partículas, las cuales se pueden aniquilar a su vez para formar de nuevo un fotón, etc. Cada uno de esos procesos tiene asociado un diagrama de Feynman determinado que permite calcular la probabilidad de que la realización del fenómeno que describe se lleve a cabo. Idealmente, para poder estudiar un proceso en concreto habría que calcular todos los diagramas de Feynman asociados. Estos diagramas son solo una forma de representación, no representan el movimiento real de las partículas, tan solo son una herramienta para calcular las características físicas de un proceso cuántico entre ellas. En la figura 1 se muestran dos ejemplos simples de diagramas de Feynman.

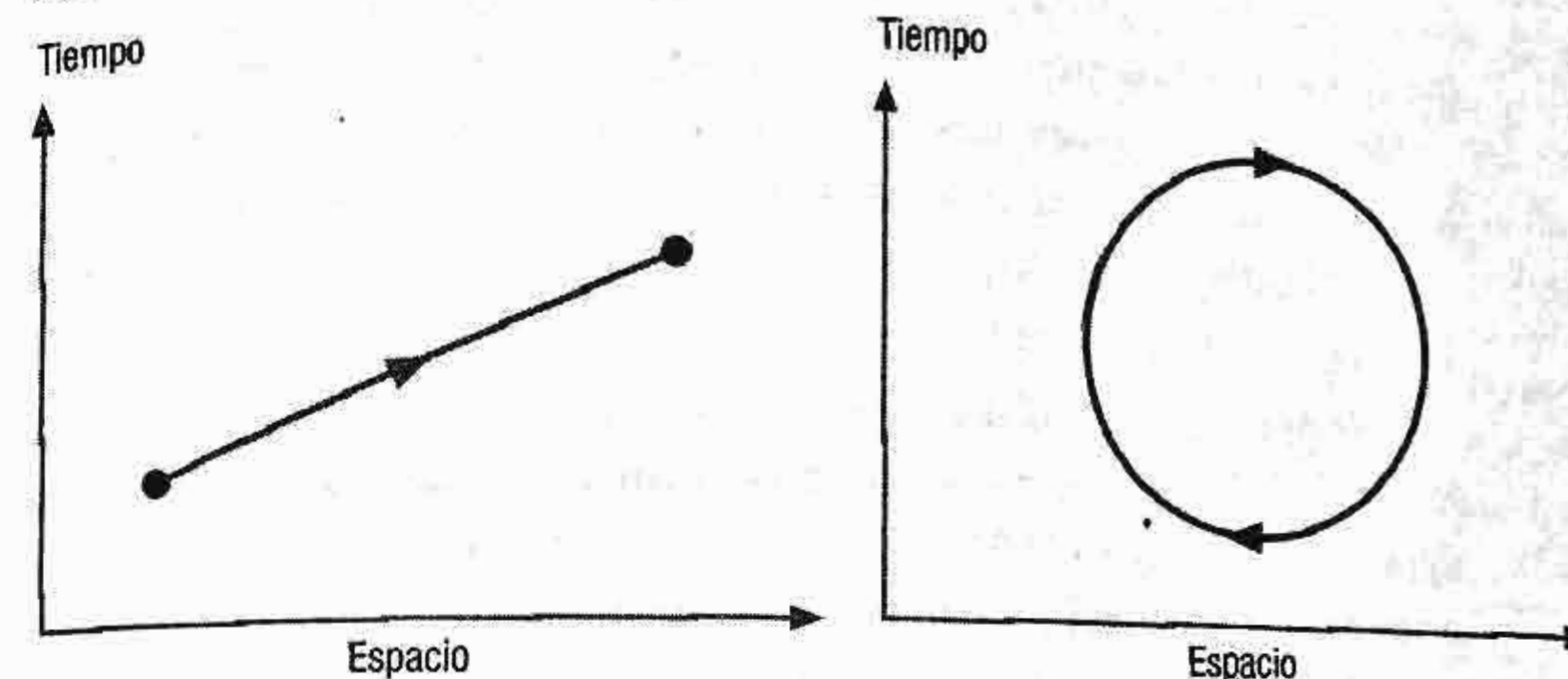
Bucles cerrados

Las fluctuaciones del vacío se representan con diagramas de Feynman mediante *bucles cerrados*. Los bucles cerrados condensan la idea de que en un determinado punto aparece un par de partículas, de forma que se conserven todas las cargas que hayan de verificar un principio de conservación, como la carga eléctrica. Esta es una de las manifestaciones de la antimateria, que es otra de las predicciones de la teoría cuántica de campos. Según este esquema, por cada partícula definida existe otra con la misma masa y espín pero con todas las cargas de signo opuesto. Cuando una partícula se encuentra con una de sus antipartículas, se desintegra emitiendo fotones de alta energía. Hay que notar sin embargo que en el bucle que representa la fluctuación del vacío simplemente se produce una aparición de partículas, una pareja partícula-antipartícula, que es reabsorbida por el vacío sin emisión de fotones ni de otra cosa; se trata sencillamente de una alteración del vacío que aparece y desaparece.

Energía para las partículas

El efecto de introducir un campo eléctrico de alta intensidad, representado por E , puede romper el bucle de aparición/reabsorción del par electrón-positrón y llevarlos a la existencia. El diagrama de Feynman correspondiente a este fenómeno, el denominado efecto Schwinger, viene representado en la figura 2. Para que este fenómeno sea posible hay que proporcionarle al vacío la energía necesaria, porque de otra forma se estaría extrayendo energía del propio vacío, cosa que no es posible. El campo eléctrico aporta la energía precisa para que las partículas salgan del vacío.

FIG. 1



Partícula moviéndose libremente entre dos puntos del espacio. La flecha refleja el flujo de la carga eléctrica.

Representación de la creación de un par partícula-antipartícula. Los flujos de carga opuestos significan signos opuestos de la carga. Es un ciclo cerrado porque se originan a partir del vacío y vuelven a él.

FIG. 2

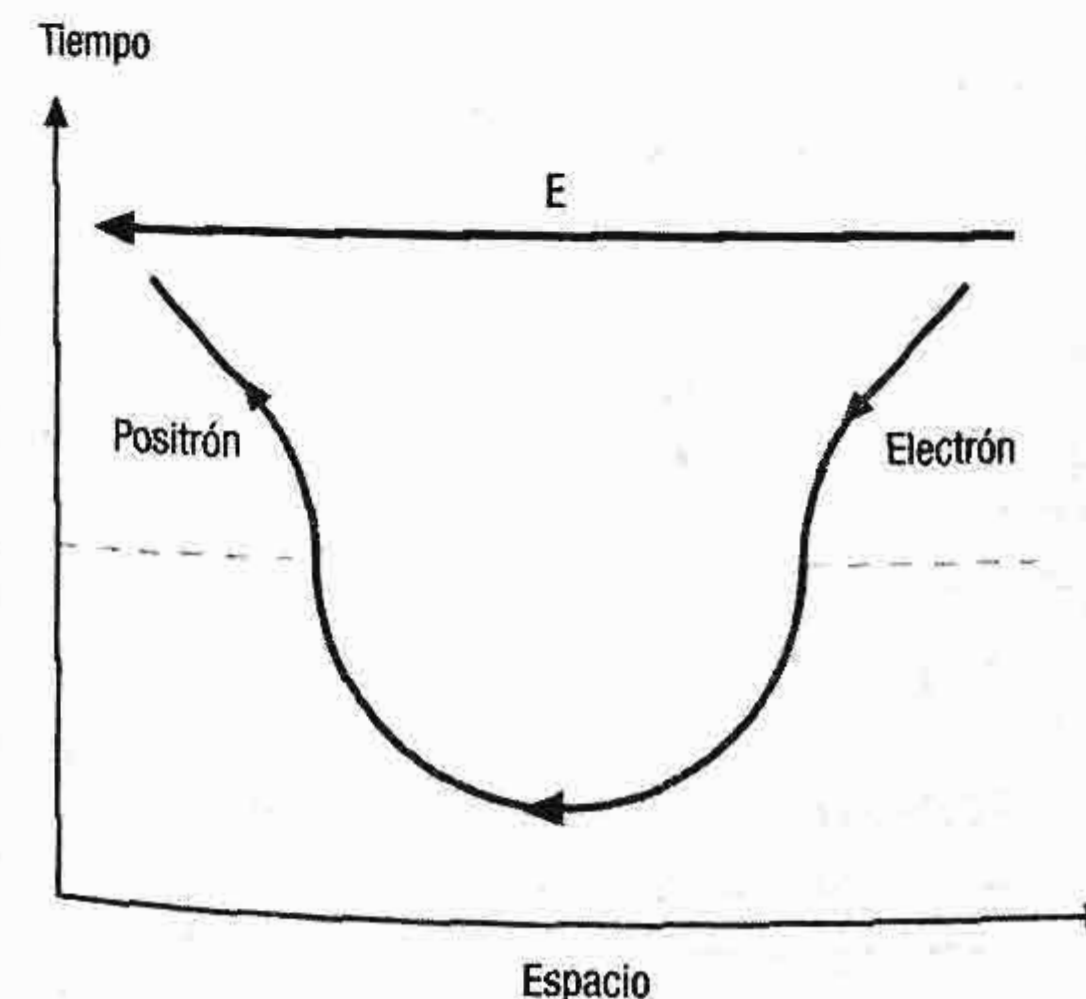


Diagrama de Feynman correspondiente al efecto Schwinger. Se observa la ruptura del bucle como consecuencia de la aplicación de un campo magnético.

una partícula de su misma masa pero de carga eléctrica opuesta, un positrón, que es la antipartícula asociada al electrón. De este modo se crea un par electrón-positrón que se reabsorberá de nuevo en el vacío como buena fluctuación del mismo, para no comprometer la conservación de la energía.

No obstante, hay una forma de hacer que estos pares electrón-positrón no se reabsorban sino que salgan disparados en direcciones opuestas y puedan ser observados experimentalmente. El secreto está en aplicar un campo eléctrico en el vacío. El campo eléctrico hará que las cargas eléctricas positivas se muevan en el sentido que marca el campo, y las negativas, en el sentido contrario.

A pesar de todo, hay un problema técnico en la realización experimental de este fenómeno: los campos eléctricos necesarios para conseguir que los pares electrón-positrón que emergen del vacío se separen y se observe su existencia deben ser desmesuradamente elevados. Habría que darle al vacío mucha energía a cambio, tanta como la que cuesta generar la fluctuación, que como mínimo es la masa del electrón más la masa del positrón. Así que, siguiendo la famosa ecuación de Einstein ($E=mc^2$), que nos define cuánta energía le corresponde a una cierta masa en reposo, habría que aplicar un campo eléctrico tan intenso que fuera capaz de proporcionarle a una fluctuación que cree un par electrón-positrón una energía de $2m_e c^2$ (la masa del electrón y la del positrón son la misma, por eso aparece el 2 en la fórmula). Si se pudiese aportar esa energía con el campo eléctrico, el par electrón-positrón se separaría siguiendo los caminos que les indicase el campo, y se observaría la aparición de cargas eléctricas del vacío.

Desgraciadamente, los campos eléctricos necesarios para llevar a cabo este fenómeno tal y como ha sido descrito son tan intensos que están fuera de nuestra actual capacidad tecnológica. Sin embargo, se están desarrollando nuevas técnicas con la ayuda de láseres de muy alta intensidad, y es posible que pronto haya resultados concluyentes sobre este efecto. Como siempre en ciencia, es cuestión de tiempo y de habilidad para desarrollar la tecnología adecuada.

EL VACÍO, UN ELEMENTO REAL

Recapitulando, los tres efectos explicados parecen apuntar a que el vacío es un elemento real en la descripción cuántica de la naturaleza y que es capaz de interactuar con determinados sistemas e influir de forma relevante en su comportamiento.

En muchos textos se da por hecho que el efecto Casimir es una demostración irrefutable de la existencia de las fluctuaciones del vacío, y esto no es cierto del todo. Hay varias formas de dar con la fuerza de Casimir sin recurrir a las fluctuaciones del vacío, al menos no de forma explícita. En todo caso, el efecto Lamb sí que es un poderoso argumento, y considerando además la multiplicidad de efectos que parecen depender del vacío cuántico, los científicos están cada vez más convencidos de sus propiedades.

Es importante apuntar además a una razón teórica que generalmente no se discute en los textos divulgativos y que está a la par con los argumentos experimentales. La teoría cuántica de campos tiene una formulación matemática exquisita que en su forma más refinada depende de manera crucial del concepto de vacío. A partir de los estados de vacío se construye y se da consistencia a toda la teoría y, como se ha dicho, esta es una de las mejor comprobadas de la física. El éxito de la teoría cuántica de campos en diversos fenómenos que van desde el estado sólido hasta la física de partículas, y la crítica dependencia de esta teoría en el concepto del vacío, son también un argumento suficiente para apostar por la validez de nuestra actual concepción acerca del vacío.

Así pues, la teoría y los experimentos de la física cuántica nos enseñan que el espacio, al extraerle toda la materia, es aún muy diferente que la nada (o la concepción clásica del vacío). El vacío cuántico, definido como el estado de mínima energía de un sistema físico, está lleno de campos que fluctúan. Estas fluctuaciones de los campos se pueden entender como una constante creación y aniquilación de partículas y antipartículas que aparecen de la nada. Pero como las distancias y los tiempos en que ocurren estas fluctuaciones son muy pequeños, los efectos de

este mar de partículas del vacío cuántico solo se puede observar llevando a cabo experimentos de gran precisión o de alta energía como los que hemos descrito en este capítulo. Afortunadamente, los científicos han ido llevando a cabo tales experimentos, convenciéndose así cada vez más de que el vacío, valga la redundancia, no está vacío.

CAPÍTULO 3

El vacío y la masa, una relación delicada

La masa es una de las propiedades de las partículas que más incógnitas arroja a las teorías convencionales sobre la materia y sus interacciones. Resulta que la masa es la manifestación de las distintas formas que las partículas tienen de relacionarse... con el vacío.

Durante el último siglo, de la mano de la teoría cuántica de campos y de los grandes avances en la tecnología, se ha podido indagar en la estructura de la materia hasta límites que habrían sido inimaginables con anterioridad. Es interesante recordar que hacia 1905 la idea del átomo como unidad fundamental de la materia era aún muy discutida en el ámbito científico. Actualmente, sin embargo, se sabe que la materia se organiza como si de una muñeca rusa se tratase, requiriendo cada vez más energía para poder ver sus niveles más profundos. Esta en su nivel más fundamental está descrita por la física de partículas en lo que se conoce como el *modelo estándar*, una de las mejores teorías que la comunidad científica ha sido capaz de describir y cuyo acuerdo entre cálculos teóricos y experimentos es ciertamente impresionante.

Así, *grosso modo*, la materia está compuesta por moléculas, y dichas moléculas son conjuntos de átomos unidos unos a otros debido a que comparten electrones. Los átomos, por su parte, están formados por electrones y núcleos unidos por la interacción eléctrica, dado que el núcleo tiene carga positiva y los electrones la tienen negativa. Pero yendo aún más lejos, los núcleos están

compuestos por protones y neutrones, los cuales a su vez contienen partículas más pequeñas denominadas *quarks* y *gluones*. Esta es una descripción simple de la estructura de la materia propiciada por lo que se ha podido explorar hasta ahora en los experimentos, los cuales sugieren que electrones y quarks no parecen tener estructuras internas, o al menos no se han hecho evidentes en los experimentos realizados en los aceleradores de partículas. Sin embargo, nunca se sabe si el futuro podrá deparar sorpresas en este sentido.

La teoría que se ocupa de describir las partículas elementales y sus interacciones, el llamado *modelo estándar*, está basada en la teoría cuántica de campos. Los campos físicos son los objetos de estudio de la teoría, y las partículas, que es lo que encontramos en los experimentos de altas energías, las entendemos como perturbaciones de estos campos. Se dice que dos partículas interactúan cuando se encuentran y cambian sus propiedades, es decir, cuando se atraen, se repelen, o se transforman en otro tipo de partículas. En el marco del modelo estándar esto ocurre debido a que las partículas intercambian otras partículas, las partículas mensajeras.

Una partícula tiene tres características: su masa, su carga y su espín. La masa es lo que se opone a que una partícula cambie su estado de movimiento: cuanto más masa tenga una partícula, más cuesta cambiar dicho estado. A la vez, la masa nos define con qué fuerza siente la interacción gravitatoria. La carga de una partícula es lo que determina cómo interactúa cuánticamente con las otras partículas: el tipo de carga nos define a qué tipo de interacción está sujeta, y la cantidad de carga nos indica con qué intensidad interactúa. El espín de una partícula da cuenta de cómo una partícula, a pesar de ser puntual (no tener estructura) gira sobre sí misma. El espín solo puede tomar valores semienteros ($1/2$, $3/2$, $5/2$, etc.) o enteros (1, 2, 3, etc.). Las partículas que tienen espín semientero las llamamos *fermiones*, y las que tienen espín entero las llamamos *bosones*. Los fermiones son las partículas que comprenden la materia, y tienen la propiedad de que no pueden ocupar un mismo estado cuántico —es decir, las partículas fermiónicas del mismo tipo no pueden estar todas en

el mismo estado—. Los bosones sí pueden ocupar el mismo estado, y son las partículas mensajeras que median en las diferentes interacciones. El modelo estándar se ocupa de describir cuánticamente las tres interacciones no gravitatorias entre las partículas, a saber: el electromagnetismo, la interacción fuerte y la interacción débil. La gravedad no entra en este esquema porque no existe aún una teoría cuántica de la gravedad que sea consistente.

El electromagnetismo es la interacción que se da entre cargas eléctricas. La carga eléctrica es una magnitud conservada y toma dos signos, positivo y negativo. Las cargas de igual signo se repelen y las de signo opuesto se atraen. El electromagnetismo está mediado por fotones, que son partículas sin masa, por lo que se mueven a la velocidad de la luz, y que no tienen carga eléctrica ni carga de color.

La interacción fuerte, descrita por la teoría llamada cromodinámica cuántica, es la interacción que se da entre quarks y que supera en mucho la intensidad del electromagnetismo. Los quarks sienten esta interacción porque tienen una carga denominada color (la cual no tiene nada que ver con la concepción habitual del color, aparte del nombre). El color puede mostrar tres variantes: rojo, verde y azul, y los correspondientes antirrojo, antiverte y antiazul. Esta interacción es atractiva y se transmite a través de *gluones*. Los gluones median la interacción entre quarks, que son las únicas partículas con carga de color, de forma tan intensa que los quarks siempre están conformando parejas de quark-antiquark —en unas partículas denominadas *mesones*—, o tríos de quarks —en unas partículas denominadas *bariones*—, de las que el protón y el neutrón son dos ejemplos. Una propiedad de la teoría que describe la interacción fuerte, conocida como *confinamiento del color*, es que no es posible extraer un único quark aislado. Para hacer eso habría que aplicar tanta energía que en el proceso se crearían nuevos quarks o antiquarks, conformando bariones o mesones según el caso. Este comportamiento se puede entender de otro modo: no se puede tener una partícula aislada con carga de color pura, roja, verde o azul. Solo es posible tener situaciones en las que una carga de color esté asociada a su anticolor, como en los mesones, o en

las que estén presentes los tres colores, como en los bariones. Las configuraciones de color-anticolor y rojo-azul-verde se denominan *conformaciones neutras*. Los propios gluones no tienen masa y no tienen carga eléctrica, pero sí tienen carga de color, así que ellos mismos están sujetos a su propia interacción y pueden interactuar fuertemente unos con otros.

La interacción débil es un tipo de fuerza física diferente a la del electromagnetismo y a la interacción fuerte, no funciona como atracción o repulsión. Su misión es la de cambiar unos tipos de partículas en otros. Esta interacción tiene asociadas tres partículas mensajeras: los bosones W^+ , W^- y Z^0 . Estas partículas son capaces de cambiar el tipo de las partículas que las «sienten»; hay dos que están cargadas eléctricamente, W^+ y W^- , y una que es neutra, la Z^0 . Las partículas mensajeras de la interacción débil no tienen carga de color pero sí tienen masa, y de hecho una masa muy elevada si las comparamos con las otras partículas elementales —su masa es mayor que la de un núcleo de un átomo de hierro—. Se trata de una fuerza de corto alcance que logra cambiar el tipo de partícula. Por ejemplo, la interacción débil permite que un electrón emita un bosón W^- y se convierta en otro tipo de partícula: un neutrino.

Una vez que se han descrito las formas no gravitatorias en las que las partículas pueden interactuar es adecuado hablar de las partículas que conforman la materia que nos rodea. Aparte de las partículas mediadoras de las tres fuerzas que hemos descrito, los bosones W^+ , W^- , Z^0 , los gluones y los fotones, tenemos los fermiones. Estos corresponden a las partículas que forman la materia y se dividen en dos tipos: los quarks y los leptones. Los leptones, al contrario que los quarks, no tienen carga de color, así que no pueden sentir la interacción fuerte. Además, tanto los quarks como los leptones se presentan en tres familias o generaciones diferentes. La figura 1 muestra un resumen de las partículas del modelo estándar.

De todos los fermiones que se han descubierto en los aceleradores de partículas —haciendo chocar partículas y creando otras nuevas—, solo tres forman toda la materia que observamos a diario: los quarks up y down y los electrones. Los quarks

FIG. 1

LAS TRES GENERACIONES DE LA MATERIA (FERMIONES)

	I	II	III	BOSONES MEDIADORES DE INTERACCIÓN	
Masa	3 MeV	1,24 GeV	172,5 GeV	0	126 GeV
Carga eléctrica	2/3	2/3	2/3	0	0
Espín	1/2	1/2	1/2	1	0
Nombre	up	charm	top	γ fotón (electromagnética)	H bosón de Higgs
	6 MeV	95 MeV	4,2 GeV	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
QUARKS	d down	s strange	b bottom	g gluon (nuclear fuerte)	
	< 2 eV	< 0,19 MeV	< 18,2 MeV	0	
	0	0	0	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e neutrino electrónico	ν_μ neutrino muónico	ν_τ neutrino tauónico	Z^0 (nuclear débil)	
	0,511 MeV	106 MeV	1,78 GeV	80,4 GeV	
	-1	-1	-1	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
LEPTONES	e electrón	μ muon	τ tau	W^\pm (nuclear débil)	

Tabla de partículas elementales del modelo estándar con sus principales propiedades.

up y down constituyen a los protones y los neutrones que hay en los núcleos de los átomos y tienen una carga eléctrica fraccionaria respecto a la del electrón, que se toma como referencia. El quark up tiene carga $+2/3$ y el quark down tiene carga $-1/3$. Un protón está formado por dos quarks up y un down, lo que le proporciona una carga de $+1$ respecto a la del electrón, mientras que un neutrón está compuesto por dos quarks down y un up, lo que hace que sea neutro. El resto de quarks solo aparece en experimentos de altas energías, son de mayor masa y por lo tanto se desintegran en partículas más ligeras rápidamente. Por ejemplo, el quark top tiene una masa comparable

a un núcleo de un átomo de oro, que contiene casi doscientos protones y neutrones, cada uno con sus quarks up y down, y se desintegra en $5 \cdot 10^{-25}$ segundos.

Los leptones son el electrón, el muon y el tau. Son partículas que comparten casi todas las propiedades, todas ellas poseen carga -1 y no tienen carga de color. Sin embargo, el muon es 200 veces más masivo que el electrón y el tau lo es 3000 veces más. A continuación se encuentran los neutrinos, que no tienen carga eléctrica ni carga de color y su masa, que aún no se conoce exactamente, es muy pequeña. Son partículas que interactúan poco, solo lo hacen por la interacción débil, y su detección supuso un gran reto para la física experimental.

Esta es una descripción en lenguaje común del estado actual de la física conocida de partículas, pero el modelo estándar tiene también una bellísima descripción matemática que esconde una pesadilla. El armazón matemático que soporta al modelo estándar es consistente única y exclusivamente en el caso de que las partículas que describe sean partículas sin masa. En otras palabras, estamos ante un golpe mortal a la teoría; por un lado es exitosa hasta grado sumo y por otro requiere que las partículas no tengan masa, lo que va en contra de toda evidencia empírica. En esta situación solo hay dos salidas posibles, o bien se desecha el modelo estándar, lo cual es difícil porque funciona bien experimentalmente, o bien se idea una forma de introducir la masa de las partículas sin que la estructura matemática de aquel se derrumbe.

La segunda opción ha sido la triunfadora. En 1965, en los albores de la elaboración del modelo estándar, diferentes científicos propusieron un modelo teórico por el cual se podría explicar, de forma consistente, por qué algunas partículas tienen masa y otras no. Es el denominado mecanismo de Higgs, el cual predice la existencia de un campo, el campo de Higgs, y de su partícula asociada, la partícula de Higgs. La existencia de esta partícula, también llamada bosón de Higgs, se confirmó experimentalmente en el acelerador LHC (Large Hadron Collider, o Gran Colisionador de Hadrones), acontecimiento que fue anunciado el 4 de julio de 2012. La partícula debe su nombre al físico británico Peter Higgs.

EL MECANISMO DE HIGGS

La confirmación del campo de Higgs fue determinante para la física. Su mecanismo, que es capaz de explicar la masa de las partículas que la poseen sin romper la estructura del modelo estándar, merece una descripción detallada. Para ello, sin embargo, es necesario introducir primero varios conceptos clave.

Los campos en su mínimo de energía

Un campo físico tiene asociada una energía determinada según sea su configuración. Los campos están definidos en el espacio, en cada punto del cual pueden tener un valor u otro; por ejemplo, si se mide la temperatura de cada punto de una habitación se estará determinando el campo de temperaturas de la misma. Efectivamente, el campo de temperaturas puede cambiar sus valores y a eso se llama *cambiar su configuración*, su estado.

En el espacio vacío, los campos asociados a las partículas que hemos visto hasta ahora están en su mínimo de energía, en su estado de vacío, y su valor es 0 en todos los puntos del espacio (excepto por pequeñas fluctuaciones inherentes a la física cuántica). Como dicen los físicos, *el valor esperado del vacío del campo es nulo*. Esta situación es la que presentan los campos de las partículas mencionadas en la figura 1: el campo electromagnético, el débil, los campos de quarks, etc. Las partículas no son más que excitaciones del campo cuántico al que están asociadas, y para que aparezcan esas partículas de forma que sea posible detectarlas, debe proporcionarse energía al campo de manera que este abandone su mínimo de energía. Así que se puede decir que el *vacío del campo* es aquel estado en el que está en el mínimo de energía, vale 0 en todos los puntos, y no hay partículas presentes.

Sin embargo, la imagen descrita no es la única posible. Hay campos en los que para disponerlos en su configuración nula, cuando el campo tiene un valor esperado del vacío nulo y no aparecen partículas asociadas, hay que dotarlos de energía. En

LA ENERGÍA DE LOS CAMPOS

Los campos tienen una energía u otra según el estado en que se encuentren. Cuando un campo está en el estado de mínima energía posible decimos que el campo está en su vacío. La configuración del campo en su vacío y alrededor de él depende del tipo de campo que se trate. Este concepto es clave para entender lo que caracteriza y diferencia al campo de Higgs respecto a los campos asociados a las otras partículas elementales.

El verdadero vacío

La física cuántica nos dice que los campos en el vacío tienen pequeñas fluctuaciones, oscilan alrededor del mínimo de energía. Estas oscilaciones son las partículas que emergen y se reabsorben en el vacío. Si el vacío del campo corresponde a que este esté en una configuración nula, es decir que valga cero en todo el espacio, el vacío no contendrá más partículas que las debidas a las fluctuaciones. En este caso, si se quiere tener una situación donde haya partículas del campo habrá que llevar al mismo a una configuración donde tome un valor distinto de cero, y para ello habrá que dotarlo de energía. Decimos que este tipo de campos tienen un vacío verdadero: cuando el campo vale cero, este está en su mínimo de energía y no hay partículas reales (figura 1). Todas las partículas elementales que conocemos excepto el bosón de Higgs tienen asociados este tipo de campos.

El falso vacío

Hay campos, en cambio, para los que su estado nulo no corresponde con su estado de mínima energía. En otras palabras, para llevar al campo a su situación sin partículas asociadas,

desde el punto de vista cuántico, hay que proporcionarle energía. Este estado, en el que el campo vale cero, se denomina *falso vacío* (figura 2).

Caída al mínimo

Sin embargo, el falso vacío es inestable, ya que cualquier perturbación, por mínima que sea, hará que el campo explore estados en los que la energía sea menor que en su estado nulo. Como todo sistema tiende a su estado de mínima energía, el campo acabará cayendo a su mínimo y tomando un valor diferente de cero. Este es el caso del campo de Higgs (figura 3).

FIG. 1

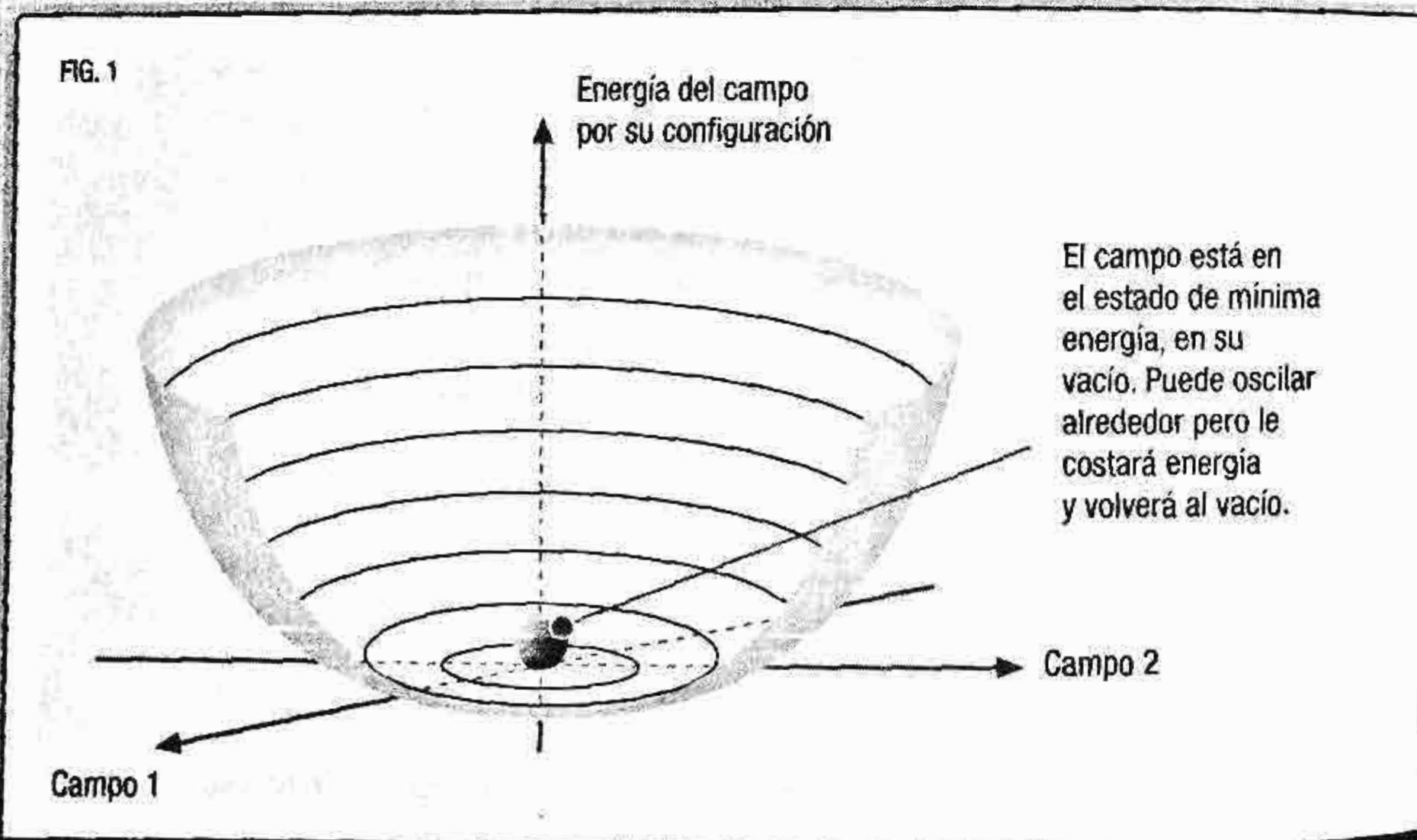


FIG. 2

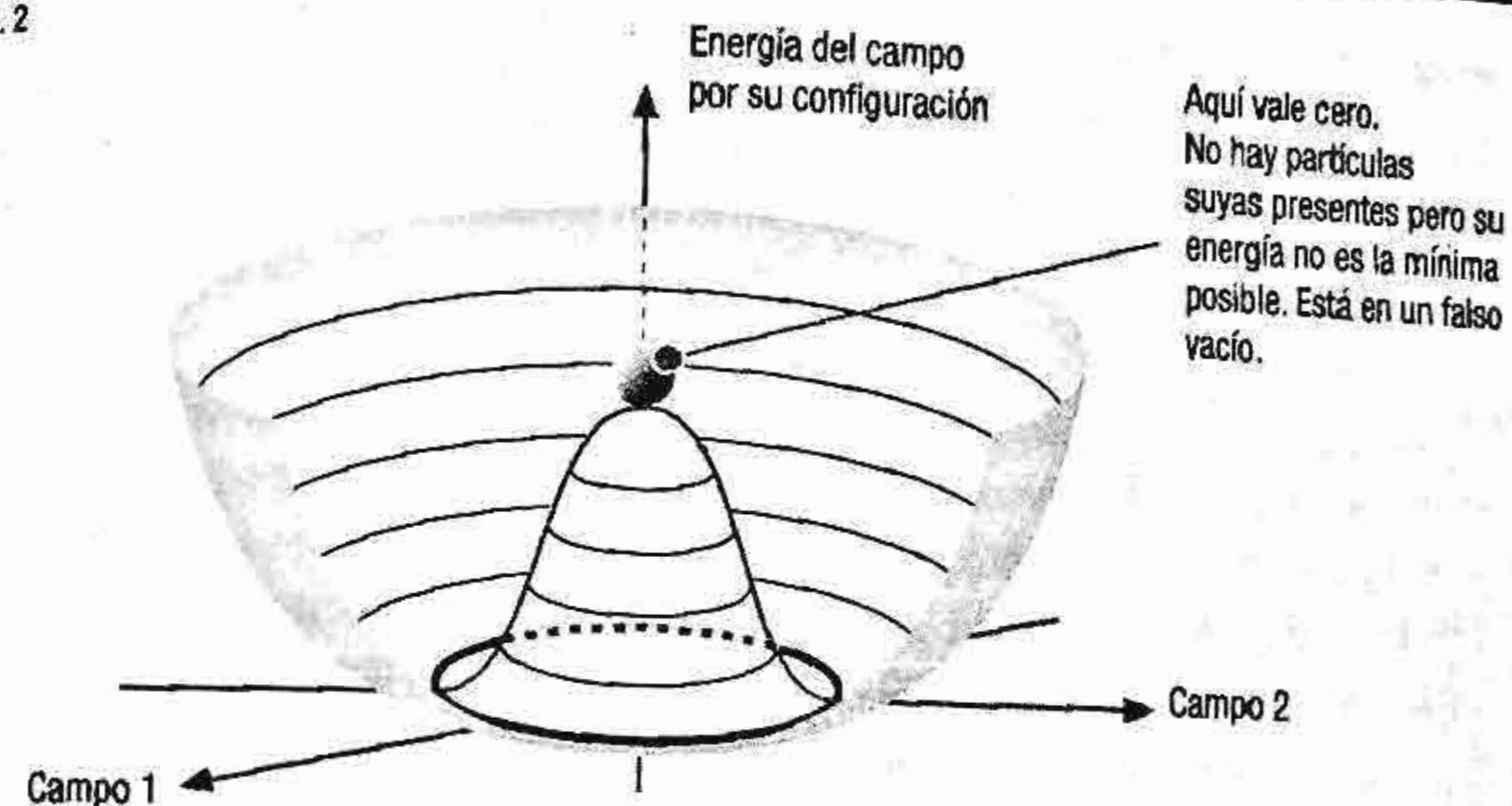
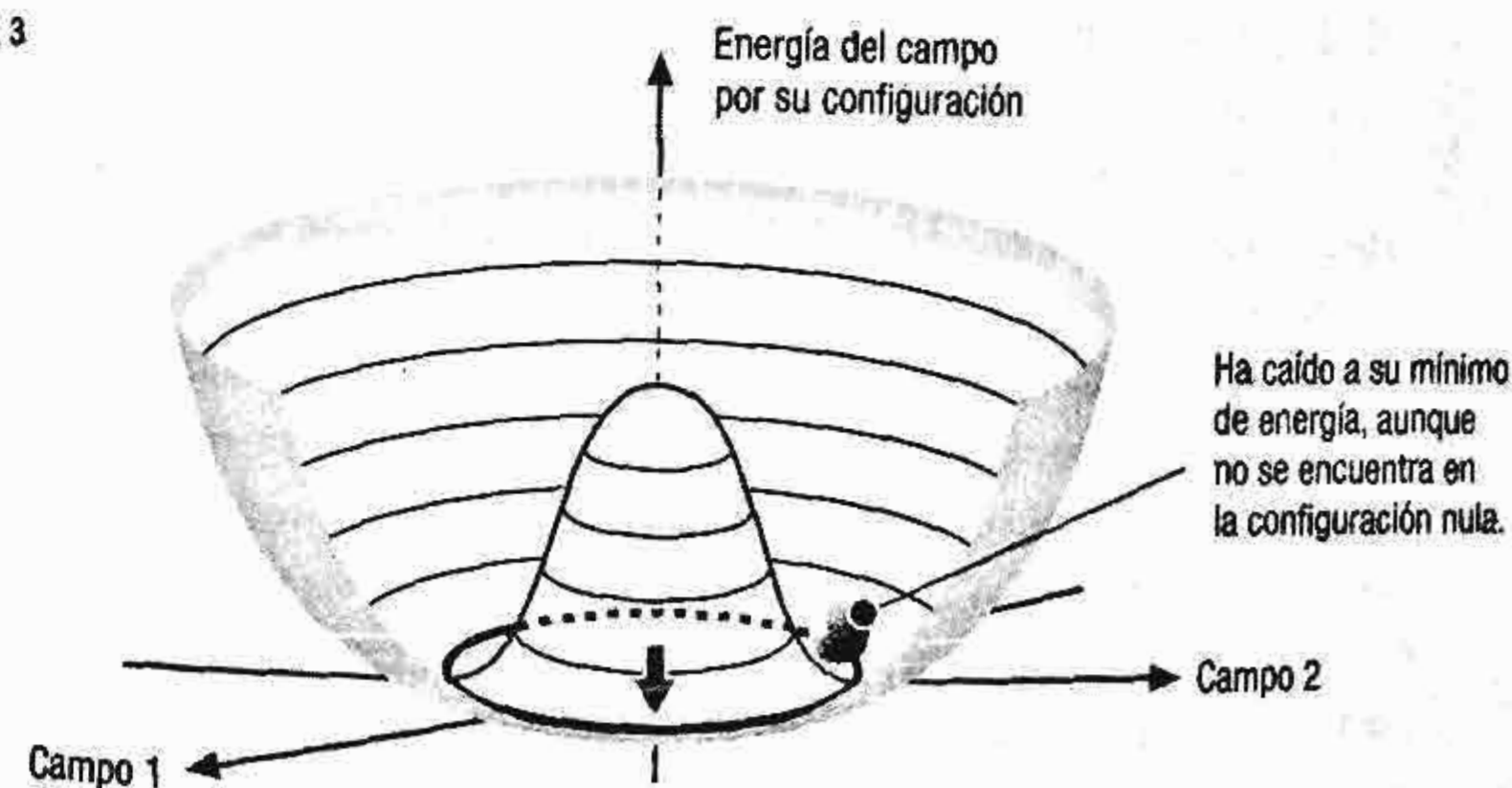


FIG. 3



estos campos hay dos nociones de vacío que no son iguales al caso anterior. Por un lado, tenemos el estado sin partículas que no está en el mínimo de energía, lo que se llama *falso vacío*, y por otro, estados con partículas asociadas al campo que están presentes con la energía mínima del campo, estado que se conoce como *verdadero vacío*. El Higgs tiene estas dos nociones de vacío y pertenece a este tipo de campos.

Nadie más se tomaba en serio lo que hacía, así que nadie quería trabajar conmigo. Creían que era un poco excéntrico y quizá irritable.

PETER HIGGS

Imaginemos un campo de Higgs en el universo con esta forma de energía asociada. Evidentemente no puede estar en su configuración nula (en la que el campo vale cero en todo el espacio) debido a que dicha configuración es inestable. El campo, como se ha dicho en varias ocasiones, está

sujeto a fluctuaciones de origen cuántico que lo intentarán apartar de esa configuración. A la menor perturbación, el campo accederá a estados de menor energía y caerá inexorablemente al mínimo, al verdadero vacío.

Eso significa que, si es posible ir al estado de mínima energía en una región del espacio, se comprobará que todos los campos excepto el de Higgs no tienen partículas asociadas presentes en dicha región, o sea, que su configuración es nula. Pero el campo de Higgs no está en dicha configuración. En el vacío, el campo de Higgs no es nulo.

El campo de Higgs tiene cuatro partículas asociadas que se denotan por H^+ , H^- , H^0 y h . La partícula que es posible detectar es la h y su existencia implica que el mecanismo funciona. Las otras tres, dos cargadas eléctricamente y una neutra, no se detectan de forma directa pero su existencia está relacionada con la masa de las partículas.

Las dos formas en las que el Higgs da masa a las partículas

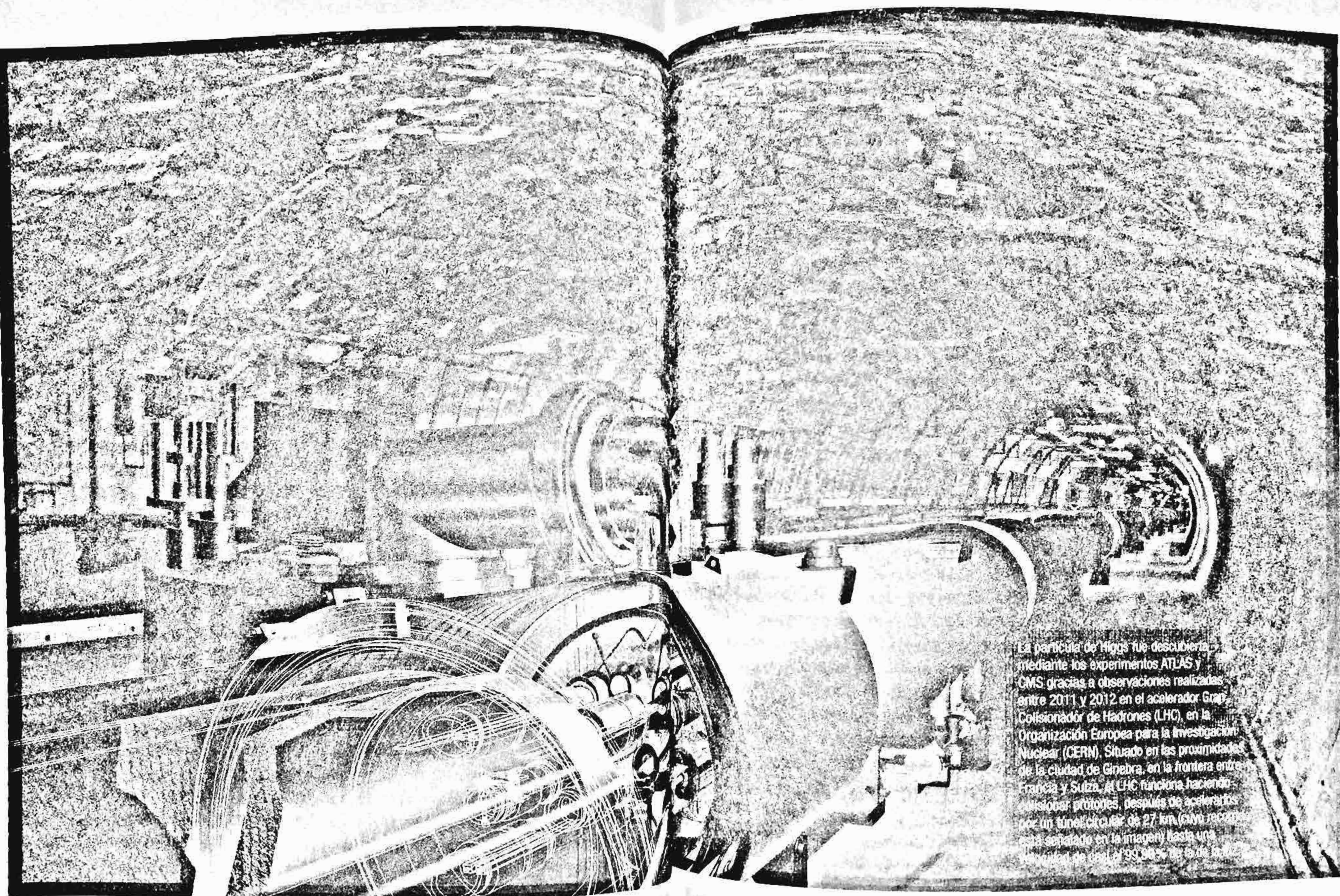
Las partículas del modelo estándar se pueden dividir en dos grandes grupos. Por un lado, las partículas que median las inte-

racciones, que son el fotón, la W (positiva y negativa), la Z^0 y los gluones, y por otro, las partículas de la materia, es decir, quarks y leptones. Las partículas que tienen masa son las W , la Z , los quarks y los leptones. Sin embargo, la forma de adquirir masa de las partículas W y Z^0 y la de quarks y leptones a través del campo de Higgs es un poco diferente.

Para las W y Z^0 el mecanismo consiste en lo siguiente: al caer el Higgs a su mínimo de energía aparecen cuatro tipos de partículas, las anteriormente indicadas: H^+ , H^- , H^0 y h . Las partículas H , en cualquier variante de carga, tienen predilección por las W y las Z^0 y se unen a ellas de forma insoluble. Esta unión hace que las W y la Z^0 adquieran masa y que las H desaparezcan, que ya no se puedan detectar más allá del efecto de dotar de masa a dichas partículas. La partícula h no interactúa con los fotones y gluones —y, por eso, estos no tienen masa— y sí es posible detectarla.

En el caso de quarks y leptones la situación es distinta. Lo que ocurre con estas partículas es que, debido a sus características, sienten la presencia del campo de Higgs, que impregna todo el espacio, e interactúan con él. Así que, si el campo de Higgs no existiera, quarks y leptones se moverían por el espacio a la velocidad de la luz, que es lo que implica no tener masa. Eso sería desastroso porque no se podrían formar protones, neutrones, y en última instancia núcleos y átomos. Afortunadamente, cuando los quarks y los leptones se propagan de un sitio a otro, van interactuando con el campo de Higgs, el cual entorpece su paso y evita que viajen a la velocidad de la luz, lo que se interpreta como inercia, o en otras palabras, masa.

Esta es la forma en la que el campo de Higgs da masa a las diferentes partículas. No obstante, el mecanismo de Higgs explica por qué algunas partículas tienen masa, pero no por qué tienen la masa que tienen. Ese es un problema todavía no resuelto de la física de partículas. Por último, debe insistirse en que toda esta construcción es consistente con la matemática del modelo estándar, que se ha encontrado a la partícula de Higgs, la h , en los experimentos y que todo el mecanismo depende de forma esencial de las propiedades del vacío.



La partícula de Higgs fue descubierta mediante los experimentos ATLAS y CMS gracias a observaciones realizadas entre 2011 y 2012 en el acelerador Gran Colisionador de Hadrones (LHC), en la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN). Situado en las proximidades de la ciudad de Ginebra, en la frontera entre Francia y Suiza, el LHC funciona haciendo colisionar protones, después de acelerarlos por un túnel circular de 27 km (cuya sección está señalada en la imagen) hasta una velocidad de casi el 99,99% de la de la luz.

No solo del Higgs vive la masa. El vacío de QCD

QCD es el acrónimo formado por las iniciales en inglés de *chromodinámica cuántica* (*Quantum ChromoDynamics*), la teoría que describe la interacción entre quarks a partir de intercambios de gluones. Es esta interacción, en realidad, la que explica el 99% de la masa de los cuerpos físicos y que no tiene nada que ver con el campo de Higgs.

Es cierto que el campo de Higgs da masa a las partículas elementales que la tienen. Entre ellas los quarks up y down que forman los protones y los neutrones —que a su vez forman los núcleos de los átomos—, y por supuesto, al electrón. La masa del electrón es en realidad despreciable, ya que es casi dos mil veces menor que la de los protones y los neutrones. Así que toda la masa de los cuerpos que nos rodean viene casi exclusivamente de la masa de los núcleos de los átomos. Pero las masas de los quarks up y down solo contribuyen con una muy pequeña parte a la masa de los núcleos —o de los protones y los neutrones—.

Tomemos el protón para hacer un simple cálculo. Para definir su masa, debido a que es muy pequeña y las unidades cotidianas (kilogramos, gramos, etc.) no son nada prácticas, usamos la unidad denominada *megaelectronvoltio* (MeV). Un MeV es en realidad una unidad de energía: equivale a un millón de veces la energía que adquiere un electrón a través de una diferencia de potencial de un voltio. La unidad de masa correspondiente sería el MeV/c^2 , pero en física de partículas usamos unidades en que la velocidad de la luz vale justamente uno, y eso nos permite usar indistintamente los MeV como masa y como energía. En estas unidades, el protón tiene una masa de aproximadamente 940 MeV. Teórica y experimentalmente se ha constatado que el protón está compuesto por dos quarks up y un quark down. La masa del quark up es de 2,3 MeV y la masa del quark down es de 4,8 MeV. Si se hace la suma de masas se obtiene $2,3 + 2,3 + 4,8 = 9,4$ MeV. Eso significa que la masa de los tres quarks que componen el protón, la que viene del campo de Higgs, solo puede justificar un 1% de la masa total del protón. Así pues, ¿de dónde viene el 99% restante de la masa?

La respuesta está en el vacío de QCD. La cuestión central es que todas las propiedades acerca del comportamiento del protón, como su carga eléctrica y su fuerte interacción, que le permite formar núcleos, se pueden explicar con solo los tres quarks up-up-down mencionados. Pero la masa no se puede explicar por ese procedimiento. Hay que tener en cuenta que los tres quarks esenciales del protón están condenados, como afirma la cromodinámica cuántica, a estar confinados en un pequeño volumen. No se pueden separar mucho unos de otros porque la interacción que los une es tremendamente poderosa. Pero esos quarks están sondeando el vacío de forma continua, están en un volumen tan pequeño que se encuentran frecuentemente con fluctuaciones del vacío que crean y destruyen rápidamente quarks y gluones. Por lo tanto, esos quarks up-up-down están sujetos a una continua interacción con las fluctuaciones del vacío en forma de otros quarks y gluones, y eso genera energía, de forma análoga al efecto Casimir. Ahora bien, siguiendo las enseñanzas de Einstein, la masa es un aspecto equivalente de la energía, y una alta energía confinada en un volumen pequeño como un protón es interpretada como una gran cantidad de masa. De esta interacción de los quarks básicos del protón con el vacío lleno de quarks y gluones que aparecen y desaparecen, adquiere el protón el 99% de su masa.

Es sorprendente que aproximadamente el 99% de nuestra masa y la de los cuerpos que nos rodean no sea más que una manifestación del vacío dentro de los protones y los neutrones, pero esta bonita idea teórica —que el protón es un objeto complicado y muy masivo debido a las fluctuaciones del vacío en su interior— ha sido comprobada experimentalmente.

¿EL VACÍO DEL FIN DEL MUNDO?

Hasta aquí se ha visto que la razón para la existencia de algo tan cotidiano como la masa de las cosas radica en última instancia en el vacío, tal y como se entiende actualmente a la luz de la mecánica cuántica. Pero hay un problema que la física aún tiene

SONDEANDO EL PROTÓN

Para ver qué hay dentro de los protones se efectúa un experimento que sigue la tradición del pionero experimento de Ernest Rutherford (1871-1937), gracias al cual se pudo entender la constitución de los átomos. En este experimento se lanzaron partículas alfa, es decir, núcleos de helio-4, contra una delgada lámina de oro. En aquella época ya se habían detectado los electrones, y el modelo de átomo que se tenía en mente era el de una masa cargada positivamente con los electrones dispuestos en su interior y en su superficie, el llamado *modelo del pastel de pasas*. Lo que se esperaba encontrar en el experimento de Rutherford era que todas las partículas pasaran a través de esta sustancia atómica. Pero lo que se descubrió es que muchas pasaban sin ser alteradas, algunas se desviaban y otras salían rebotadas. Esto significó una revolución, porque esos resultados solo se pueden explicar si el átomo está formado por un núcleo donde se concentra toda la masa y carga positiva y los electrones están moviéndose a su alrededor debido a la atracción eléctrica. Así, las partículas que pasaban entre el núcleo y los electrones seguían su camino, si pasaban muy cerca del núcleo sentían la repulsión y se desviaban de su trayectoria, y si colisionaban con él rebotaban.

Electrones contra el protón

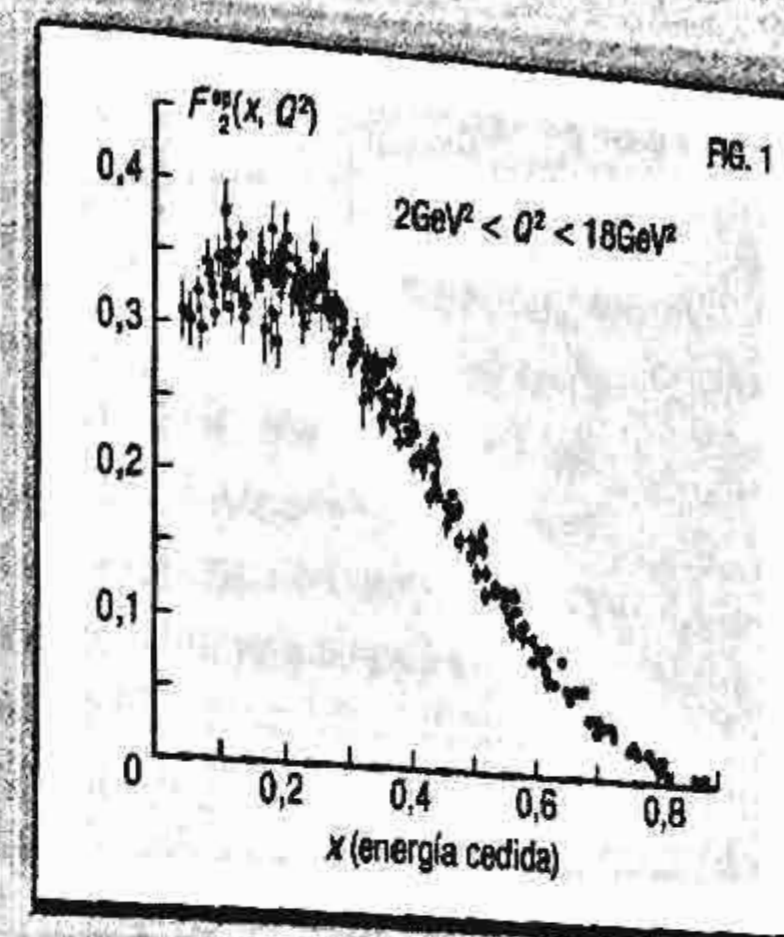
Para estudiar el interior de los protones se emplea una idea similar, si bien en este caso se lanzarán electrones de altísima energía. Lo que se espera obtener es que los electrones pierdan energía, la cual habrá sido cedida a las partes que hipotéticamente compongan al protón —los llamados *partones*—, y que estos se desvíen en determinados ángulos respecto de la dirección de incidencia. Si la hipótesis es que el protón está formado por tres quarks, estos son tres elementos con masa y carga y, por tanto, habrá tres puntos que producirán desviación en la trayectoria de los electrones. Cuando se lleva a cabo este experimento se pueden medir las energías y las direcciones de los electrones dispersados y así determinar qué fracción de la energía total del protón tiene cada partón. La figura 1 muestra la probabilidad relativa (eje vertical) que tiene un partón de tener un fracción x de la energía total del protón (eje horizontal).

Añadiendo interacciones y fluctuaciones

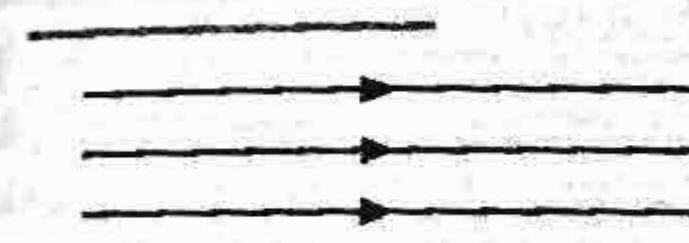
En el caso en que el protón estuviese formado por tres quarks de la misma masa y carga y que no interaccionasen deberíamos encontrar que cada partón tuviese exactamente un tercio de la energía total. Es decir, toda la probabilidad estaría concentrada en $x = 1/3$, como se muestra en la parte superior de la figura 2. Cuando se añaden las interacciones entre los quarks debido a los gluones, tenemos una imagen en que los partones van cambiando su energía. La estimación teórica correspondiente a esta situación está representada en la gráfica central de la figura 2. Como se puede observar, aún hay una gran probabilidad de que los partones tengan una fracción de la energía cercana a $x = 1/3$. Por último, podemos añadir en la estimación teórica la contribución del mar de quarks y gluones que aparecen en el vacío y que interactúan con estos tres quarks principales. La curva correspondiente a esta imagen del protón viene dada por la gráfica inferior de la figura 2.

Algo más gracias al vacío

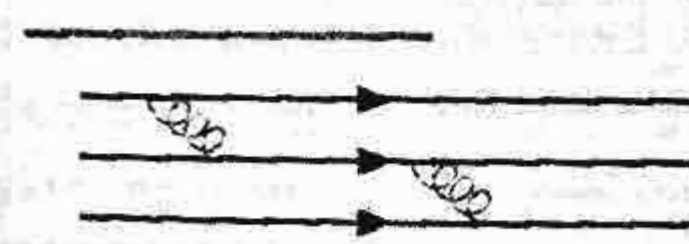
Los resultados experimentales de la figura 1, donde Q^2 es la transferencia de momento entre electrones y protones, no dejan mucha duda: siguen el patrón de la tercera opción expuesta en la figura 2, que sugiere que existe una contribución del vacío. Dentro del protón hay más cosas que tres quarks unidos por gluones, y esas cosas proceden del vacío. De hecho, los tres quarks up-up-down que forman un protón tienen masas conocidas y su suma solo puede justificar el 1% de la masa de los protones. El restante 99% de la masa es energía que proviene del vacío y que se encuentra condensada en el interior del protón.



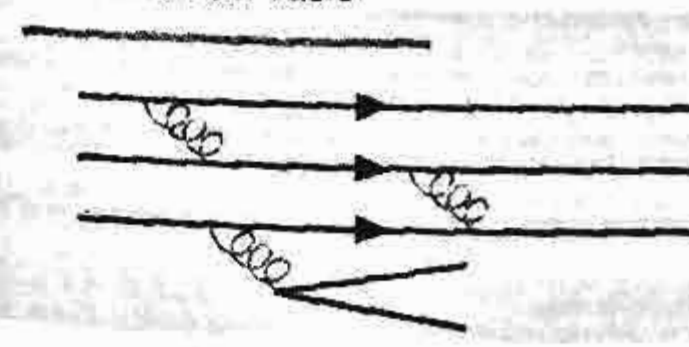
Solo tres quarks en el interior



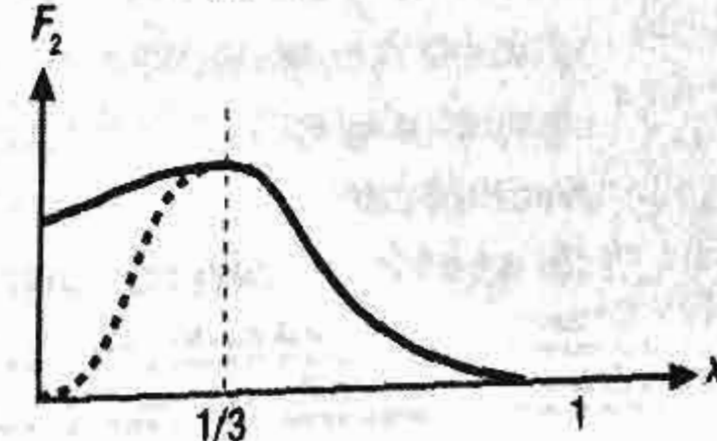
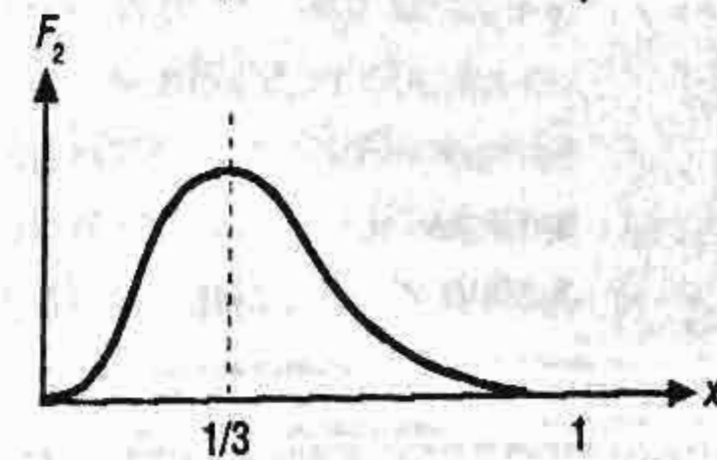
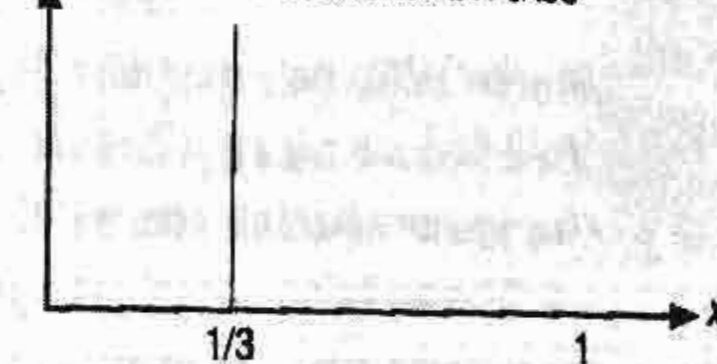
Tres quarks unidos por gluones



Tres quarks unidos por gluones y contribución del vacío



RESULTADOS EXPERIMENTALES PREVISTOS EN CADA CASO



Cuando miras al vacío en una teoría cuántica de campos, no es exactamente nada.

PETER HIGGS

La argumentación expuesta hasta ahora se fundamenta en que los campos descritos por la física cuántica tienen asociadas partículas y en que se puede definir un estado de vacío de los mismos, el estado de mínima energía. Para los campos diferentes al Higgs el estado de mínima energía corresponde a una situación en la que no hay partículas presentes del campo (para generarlas hay que dotar de energía al campo en cuestión). Se pueden tener pues electrones si el campo electrónico se excita, y eso lo hace interactuando con el resto de campos, como campos de fotones, de partículas W o Z, etc., dependiendo de la interacción que se dé en cada momento. Pero a todos los efectos, la física de todo cuanto nos rodea se describe como pequeñas variaciones en el vacío y pequeñas fluctuaciones del mismo. Por ejemplo, que el campo de Higgs caiga a su vacío es lo que permite la existencia de partículas H —que proporcionan masa a las W y Z— y la partícula *h* que detectamos en los aceleradores.

Ahora bien, aquí surge una cuestión interesante: ¿podemos asegurar que estamos en el mínimo real del campo?, ¿existe un estado con aún menos energía para el campo de Higgs? De ser así el campo de Higgs podría pasar espontáneamente a ese estado de aún menor energía. El problema es que el paso al nuevo estado, la nueva configuración, modificaría el comportamiento del campo de Higgs y eso cambiaría la masa de todas nuestras partículas. Eso supondría un fenómeno dramático porque los átomos son estables debido, entre otras cosas, a que el electrón y las partículas W y Z tienen la masa que tienen. Si cambian las masas de estas partículas cambiarían tanto la química como las reacciones nucleares que se producen en nuestro Sol, haciendo inviable la vida.

Se pueden dar tres situaciones en este contexto. Primero, que el campo de Higgs haya alcanzado su mínimo de energía, con lo que la física sería estable y no sufriría ningún cambio.

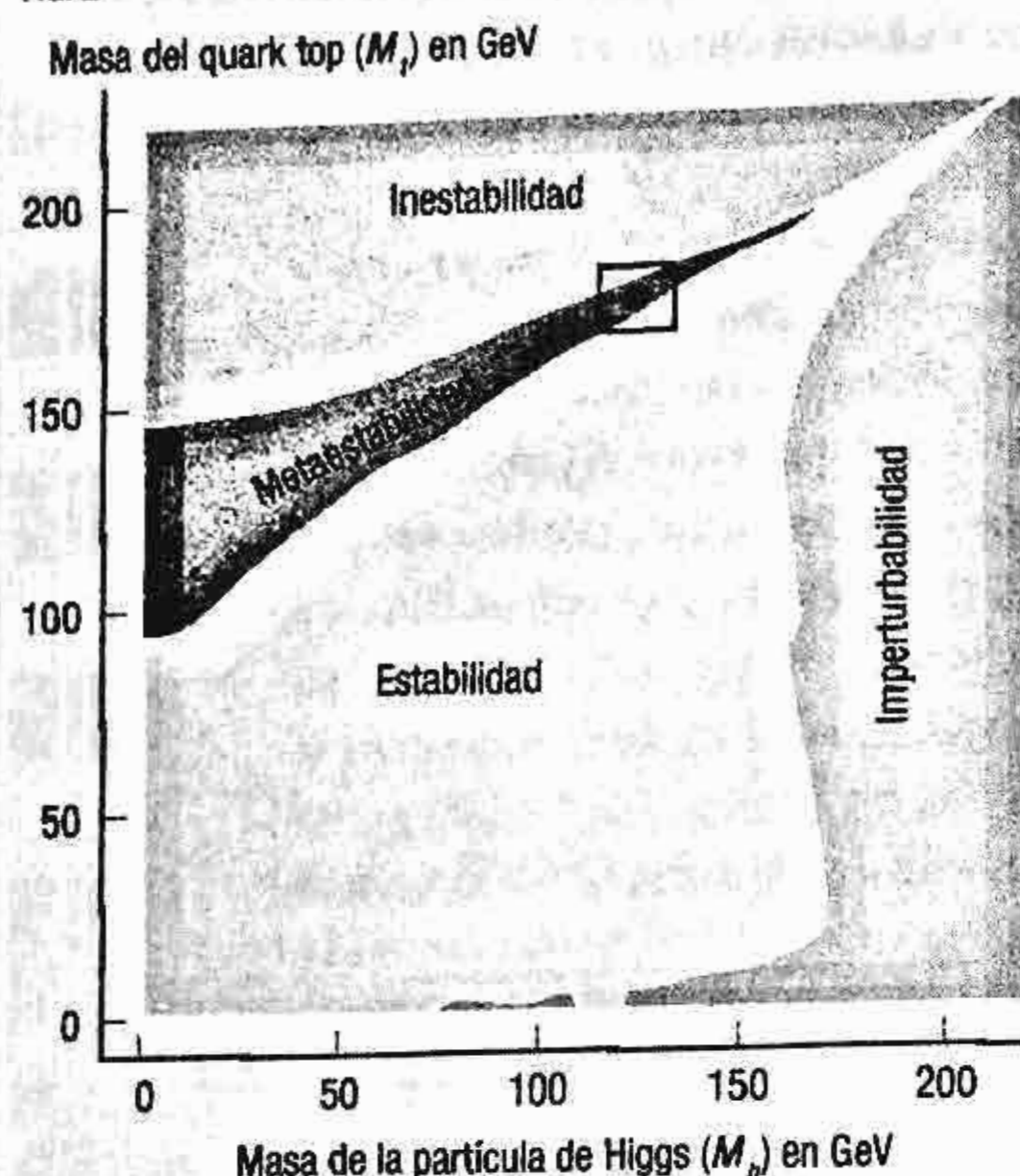
que resolver y es que toda la materia que nos rodea puede ser inestable en un sentido en particular.

Es lo que permitía decir que el modelo estándar es estable. Segundo, que estemos en un valor cercano al mínimo de energía del campo de Higgs pero que haya otro solo un poco más pequeño. En esta situación el Higgs generaría un vacío *metaestable* porque aunque la situación no es la mínima posible y una perturbación lo podría llevar al verdadero mínimo, la probabilidad de que eso ocurra es muy pequeña, ya que no hay mucha diferencia entre una energía y otra. Por último puede pasar que el Higgs no esté en su mínimo de energía y que este sea muy diferente de su estado actual. En ese caso podría hacer una transición al verdadero mínimo, ya sea de forma espontánea o porque le proporcionemos la suficiente energía como para ir de un mínimo a otro. Entonces diríamos que el campo de Higgs se encuentra en un *vacío inestable*.

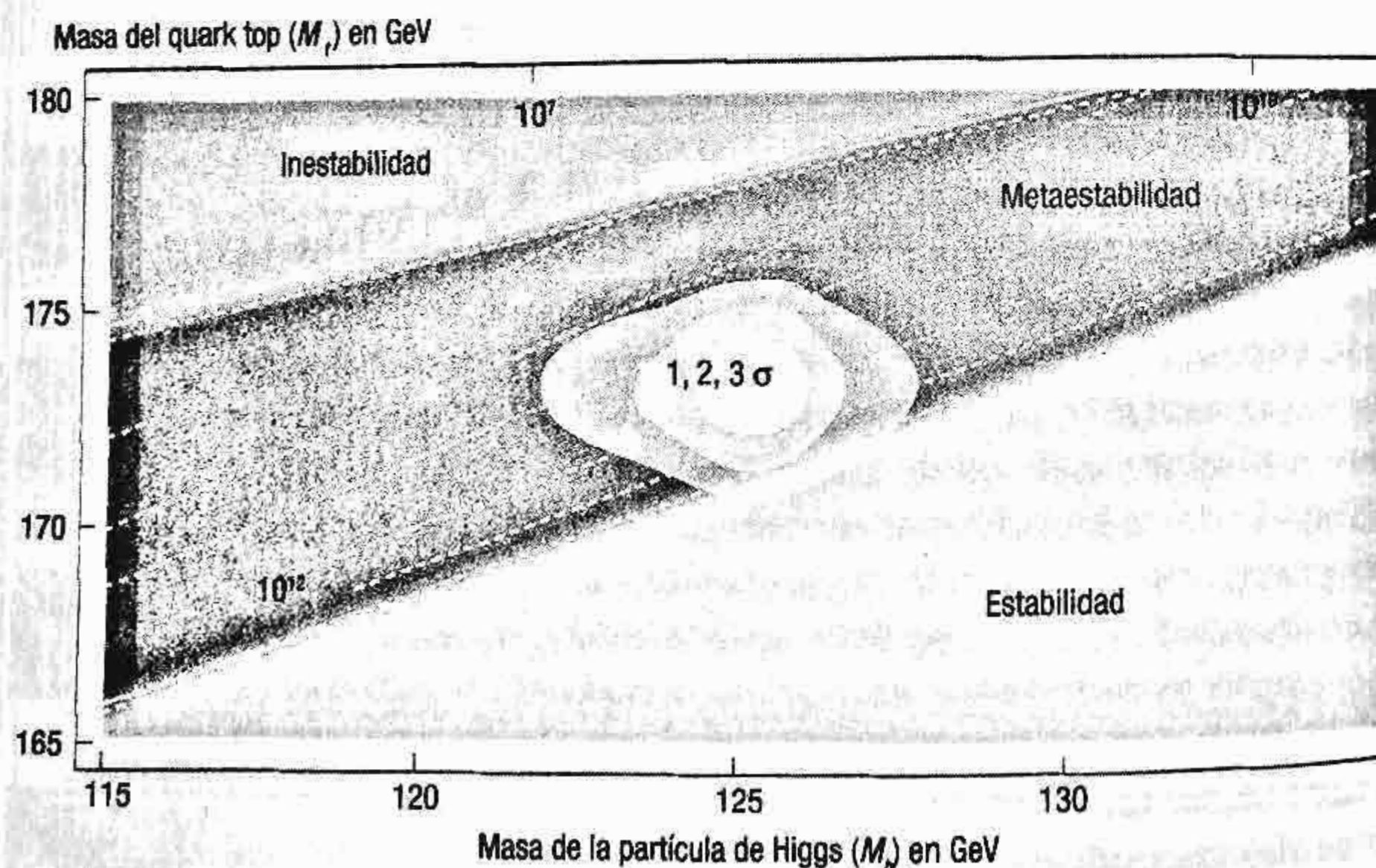
El modelo estándar puede indicarnos si el vacío del campo de Higgs es estable, metaestable o inestable comparando los valores de la masa de dos de sus partículas, el quark top y la partícula de Higgs. Con los datos actuales en la mano, la masa del top es de aproximadamente 173 GeV (*gigaelectronvoltio*, 1000 veces mayor que un MeV), y la de la partícula de Higgs es de 126 GeV (figura 2). En base a ello, la teoría concluye que el vacío en el que nuestra física tiene lugar es metaestable y que podría cambiar en cualquier momento si el campo de Higgs pasa a su estado de menor energía.

Afortunadamente, no hay de qué preocuparse. Todo lo anterior es cierto, pero también lo es que el modelo estándar, a pesar de ser una espléndida teoría que hace magníficas predicciones que después se confirman en los experimentos, no es la teoría final de la física de partículas. El modelo estándar ha funcionado muy bien hasta las energías que se han sondeado experimentalmente, pero tiene problemas abiertos que requieren de nueva física que se está explorando, conceptos como por ejemplo *dimensiones extra* o *supersimetría*. Además, el modelo estándar no incorpora la gravedad, una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza. Cualquiera de estas nuevas físicas podría cambiar el estudio de estabilidad del vacío. Así que hay que tomar eso como lo que es, un resultado

FIG. 2



Las figuras muestran en el eje vertical la masa del quark top, y en el horizontal, la de la partícula de Higgs. Dependiendo de la relación entre ambas (representada por los diferentes puntos en el plano de la figura) se puede decir si el vacío donde nuestra física se desarrolla es inestable, metaestable o estable. Los valores de las masas medidas de estas partículas en los aceleradores nos indican que estamos en una situación metaestable, pero muy cerca de la estabilidad. La gráfica inferior muestra una ampliación de la zona interesada. La σ de la figura inferior nos indica cuán buenos son nuestros datos experimentales comparados con el promedio de los mismos. Por ejemplo, para resultados incluidos en 3σ sabemos que casi el 98% de los mismos son consistentes con el resultado experimental esperado, y podemos asegurar que tenemos un resultado en el que podemos confiar.



preliminar en una teoría que se sabe que hay que superar en algún momento. Por otra parte, el universo lleva estable 13800 millones de años, así que aunque estuviésemos en una situación metaestable, la probabilidad de que haya un cambio de vacío justamente ahora es minúscula.

En definitiva, a pesar de haber avanzado mucho en la comprensión del vacío y de sus tan relevantes consecuencias, como dotar de masa a las partículas elementales (a través del vacío del campo de Higgs) y los protones y los neutrones (a través del vacío de QCD), todavía queda mucho por estudiar acerca de él y de su comportamiento.

CAPÍTULO 4

El universo, ¿un gran préstamo del vacío?

Todo apunta a que nuestro gran y frío universo surgió del vacío. Mirar al espacio es, posiblemente, contemplar la mayor expresión del vacío cuántico.

Antes de la formulación de la relatividad general, en noviembre de 1915, el estudio del universo como un sistema físico de pleno derecho era considerado una actividad espuria y sin futuro. Desde entonces, las cosas han cambiado mucho. La cosmología, la rama de la física que estudia el origen y evolución del universo, se ha convertido en uno de los campos de investigación más activos y que arroja cada vez mejores datos experimentales para poder desarrollar modelos teóricos.

Podemos afirmar sin miedo a equivocarnos que la cosmología está aún en su infancia, pero gracias a las mejoras en telescopios, satélites, aceleradores de partículas y computadoras, la ciencia se está acercando cada día más a comprender cómo se originó el universo y cómo ha evolucionado de la forma que lo ha hecho. Por supuesto que aún queda mucho por aprender y por mejorar, pero en este inicio del siglo XXI se han dado verdaderos pasos de gigante. Hemos aprendido que el universo es mucho más grande de lo esperado, que se expande de forma acelerada y que está mayoritariamente compuesto por cosas que todavía no comprendemos, cosas que se han denominado *materia y energía oscuras*. Uno de los hechos más sorprendentes es que, los avances

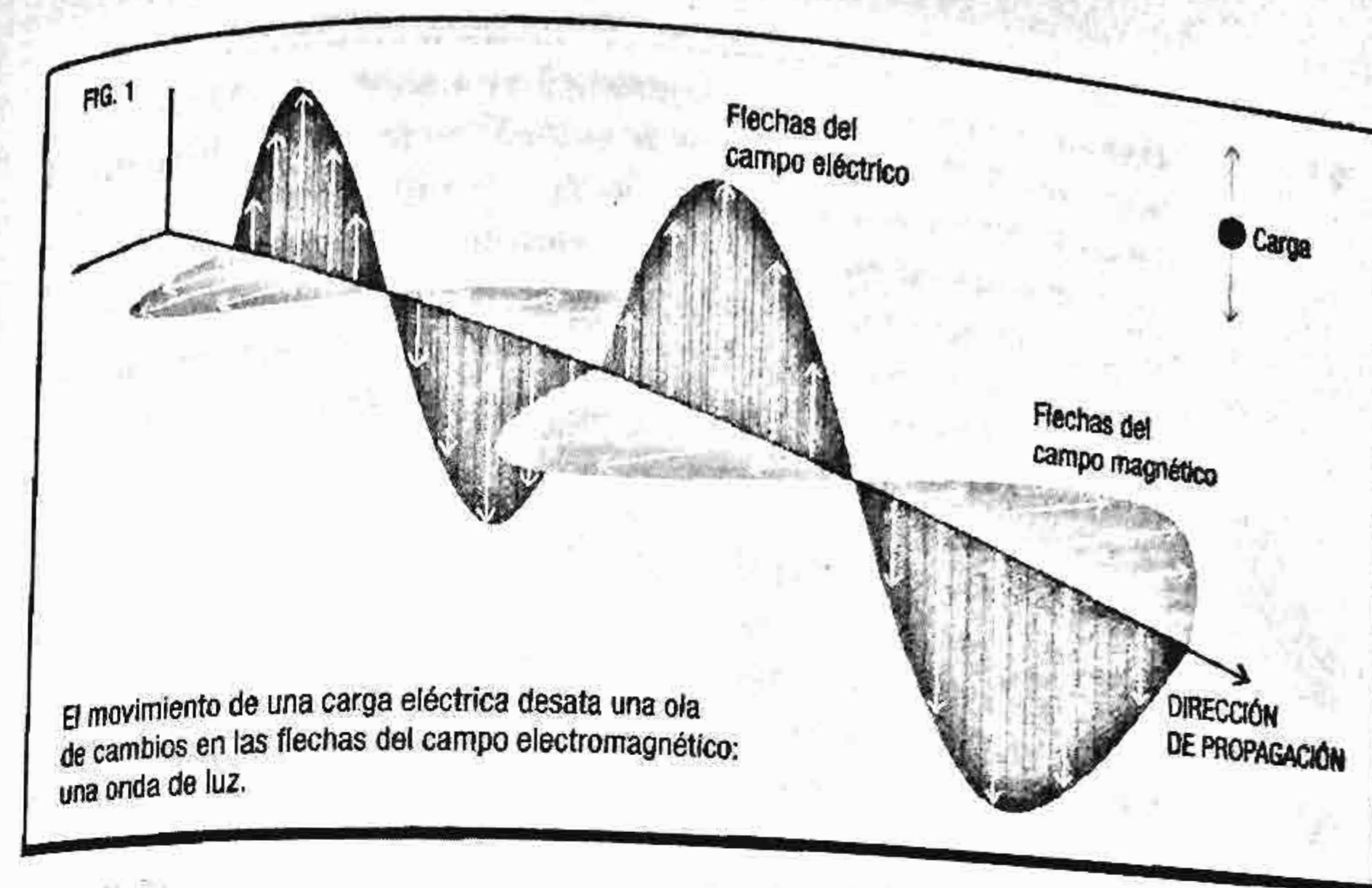
en cosmología, parecen demostrar que todo el universo pudo haberse originado de forma espontánea a partir del vacío cuántico. Posiblemente esta sea una de las sospechas más asombrosas que haya tenido la humanidad fruto de la acumulación de evidencias científicas. Habrá que mejorar las teorías y los aparatos experimentales para dar una respuesta definitiva a la cuestión del origen del universo, pero por ahora el camino está siendo fascinante y estamos aprendiendo mucho más de lo esperado.

EL UNIVERSO SE EXPANDE

Hacia 1929 el astrónomo Edwin Hubble puso encima de la mesa un revelador descubrimiento: el universo se está expandiendo. Esta no era una afirmación trivial y mucho menos en la época en la que fue formulada por primera vez, dado que el consenso general entonces era que el universo era estático y eterno. Sin embargo, los datos del astrofísico americano eran irrefutables y lo son aún más actualmente, cuando se han acumulado muchas más evidencias al respecto. Hubble estaba analizando la distribución de galaxias en nuestras inmediaciones y para ello estudiaba la luz que se recibía de ellas. Para entender lo que descubrió es preciso hablar un poco de qué es la luz, cuáles son sus características y cómo interacciona con la materia.

Ondas por el espacio

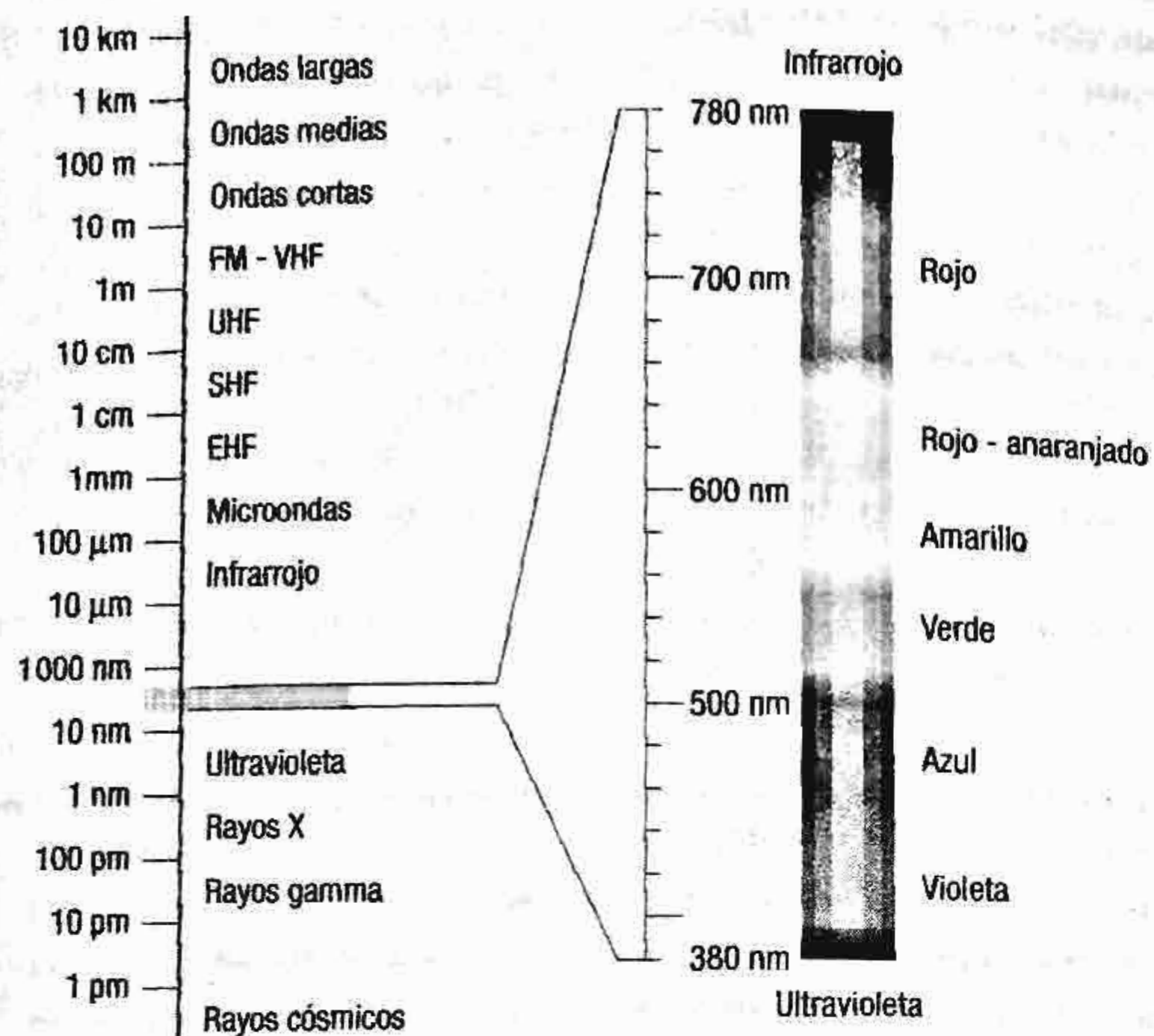
La luz es una onda electromagnética, es decir una continua oscilación de los campos eléctrico y magnético que se propaga en el espacio. La teoría que describe el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos sin considerar efectos cuánticos, el electromagnetismo, fue establecida en su forma definitiva por James Clerk Maxwell en 1861. Esta teoría afirma que los campos eléctrico y magnético en realidad forman parte de una misma entidad, el campo electromagnético, y que los cambios en uno de ellos siempre van asociados a cambios en el otro. Así que,



si es posible generar un campo eléctrico variable, por ejemplo moviendo un electrón, a la vez se generará un campo magnético variable. Esta oscilación en tándem de los dos campos desemboca en la generación de una onda electromagnética. Estas ondas electromagnéticas se propagan por el vacío con una velocidad de 299 792 km/s, la velocidad de la luz en el vacío, que denominamos c . Una onda electromagnética puede representarse como en la figura 1. Una magnitud importante asociada a las ondas es su *longitud de onda*, que no es más que la distancia entre dos puntos máximos de una de ellas.

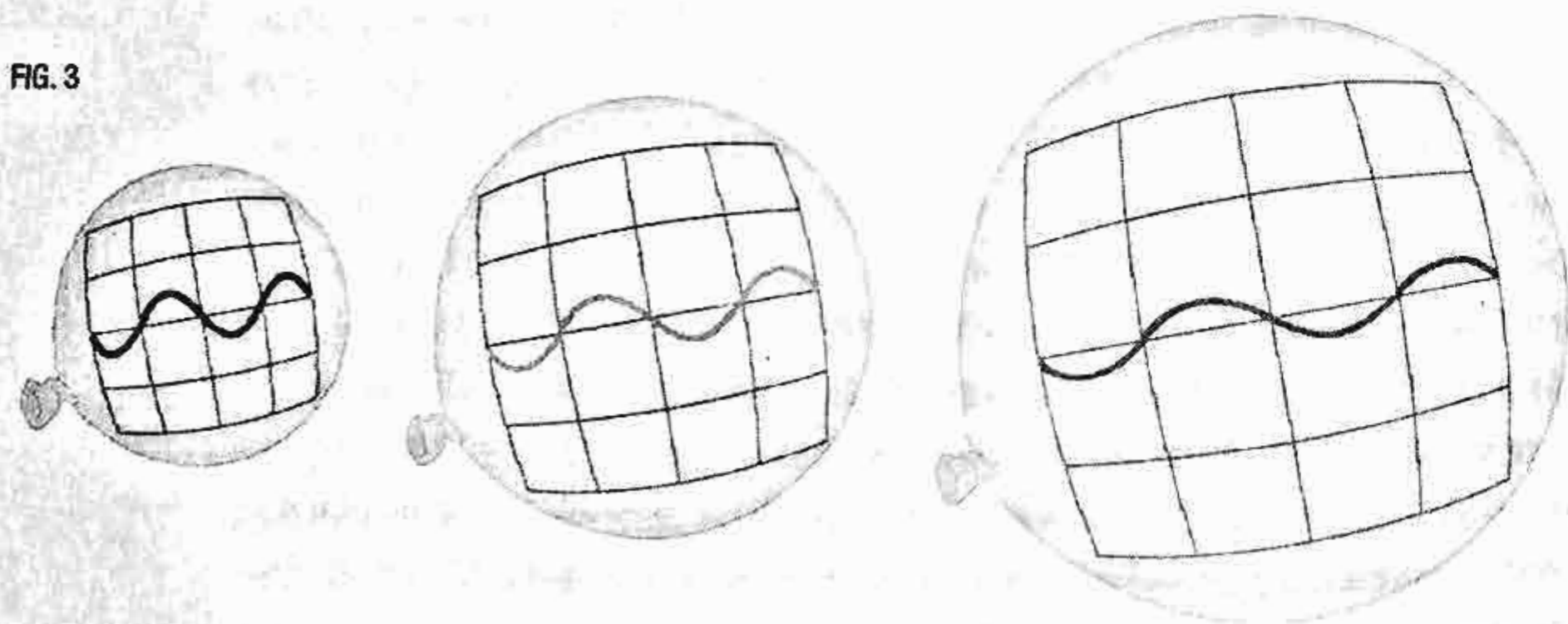
Gracias a la longitud de onda se pueden clasificar las ondas electromagnéticas en distintos tipos, dando forma al *espectro electromagnético* (figura 2): dichos tipos incluyen a los rayos gamma, los rayos X, el ultravioleta, la luz visible, el infrarrojo, las microondas, las ondas de radio, etc. Lo que llamamos habitualmente luz corresponde solo a una pequeña parte de todo el espectro, la radiación electromagnética que nuestros ojos son capaces de detectar y que ocupa el rango de longitudes de onda que se extiende desde los 400 nm (violeta) a los 700 nm (rojo). Un nanómetro, nm, equivale a una millonésima de milímetro.

FIG. 2



El espectro electromagnético con la porción de la luz visible ampliada.

FIG. 3



Si nuestro universo está en expansión, el efecto resultante es que la distancia entre dos puntos cualesquiera aumenta con el tiempo sin que estos puntos se muevan uno respecto al otro, o sea, simplemente se ven arrastrados por dicha expansión. Una onda que viaja en un espacio en expansión, al igual que una onda dibujada en un globo que se expande, aumenta su longitud de onda, es decir, experimenta un desplazamiento al rojo.

El análisis cuántico de las ondas electromagnéticas muestra que están compuestas por fotones. Los fotones tienen energía, siendo esta mayor cuanto menor es la longitud de onda de la onda electromagnética asociada. Así, los fotones azules tienen mayor energía que los fotones rojos porque la longitud de onda del azul es menor que la del rojo.

Según la relatividad general, los sistemas físicos con energía generan y sienten la gravedad, así que la luz ha de sentir también su influencia. Con la relatividad general los físicos aprendieron que la gravedad no es más que la manifestación de la curvatura del espacio-tiempo producida por regiones que contienen una gran cantidad de energía. En nuestro entorno, donde la gravedad es muy pequeña y el espacio está apenas curvado, la luz se propaga de un punto a otro siguiendo una línea recta. Sin embargo, en el universo es posible que la luz, en su propagación hacia nosotros, se encuentre con regiones curvadas por grandes cantidades de energía, por ejemplo con toda una galaxia. En este caso, la luz curvará su trayectoria siguiendo los caminos que le dicte la geometría que irá sondeando en su camino. Este efecto se ha medido cientos de veces y se denomina *efecto de lente gravitatoria* porque es una modificación de la propagación de la luz equivalente a la que se consigue con lentes ópticas.

El descubrimiento de Hubble

Cuando se contempla la luz emitida por las galaxias se está en realidad mirando hacia el pasado de nuestro universo. Debido a que la luz posee una velocidad determinada, c , y que esta es la velocidad máxima a la que un objeto puede viajar en el universo, conforme se mira más lejos en él, la luz recibida habrá tardado más tiempo en llegar y se ve un universo más joven. Es decir, cuanto más lejos se observa, más hacia el pasado se adentra el observador.

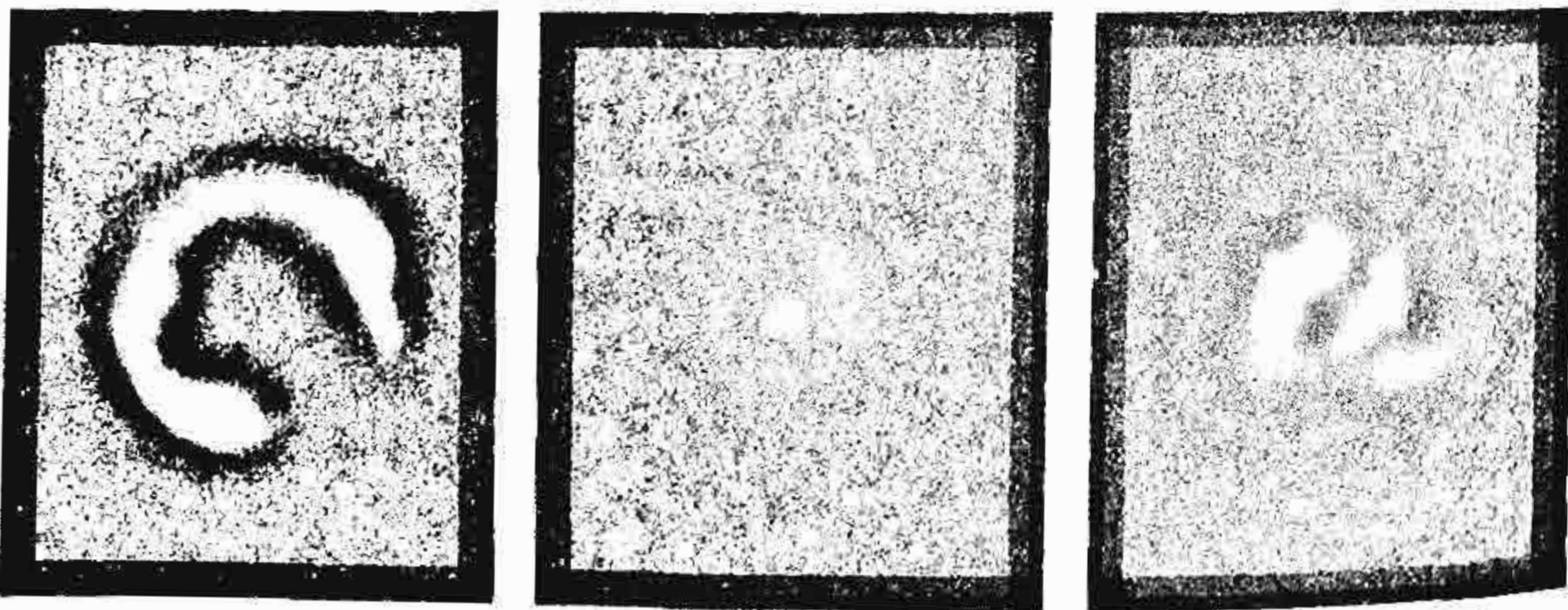
Lo que descubrió Hubble, y comprueban a diario astrónomos y astrofísicos, es que la luz emitida por las galaxias tiene un extraño comportamiento: su longitud de onda es mayor de lo esperado (figura 3). Este fenómeno se denomina *desplazamiento*

LENTE EN EL COSMOS

Las lentes gravitatorias proporcionan a los astrónomos imágenes de estructuras que de otro modo no estarían a su alcance. En las siguientes fotografías puede apreciarse un ejemplo de lente gravitatoria. La imagen grande de la derecha es una observación realizada por el telescopio Hubble. Lo que se aprecia es una galaxia rodeada por un halo difuso. Ese halo corresponde a otra galaxia que se encuentra justo detrás de la primera, que en principio no se podría ver, pero que se observa como un anillo. En las fotos inferiores se ha desglosado la información en tres: a la izquierda, el anillo o halo sin la galaxia más cercana; en el centro, la galaxia que conforma el objeto central, y a la derecha, una reproducción computacional de la galaxia más lejana. Queda claro que la imagen de la galaxia lejana se ha deformado de algún modo al pasar por las inmediaciones de la que se interpone entre ella y nosotros por el efecto de lente gravitatoria.

La realidad de la curvatura del espacio-tiempo

El efecto de lente gravitatoria es una predicción de la relatividad general que establece que el espacio-tiempo se curva en presencia de grandes concentraciones de masa y energía. Literalmente permite observar luz que está siguiendo caminos propios de una geometría curvada. Es la mejor prueba, visualmente hablando, de que está actuando la curvatura del espacio-tiempo. En la actualidad se conocen cientos de ejemplos y el efecto de lente gravitatoria juega un papel importantísimo en la astrofísica y la cosmología. Por ejemplo, gracias a este efecto, y especialmente a su dependencia de la cantidad total de energía del sistema que lo origina, se tienen pruebas indiscutibles de que la cantidad de materia contenida en una galaxia es mucho mayor de la que podemos observar por su emisión de radiación electromagnética. De otro modo no se podría generar el efecto de lente que produce. El efecto de lente gravitatoria es, pues, una de las pruebas más contundentes de la presencia de materia oscura en nuestro universo.



De izquierda a derecha, la galaxia situada en el fondo deformada por la lente gravitatoria, llamada SDSSJ1430; la galaxia central que produce el efecto, y el aspecto que tendría la primera sin deformación, obtenido gracias a un estudio computacional.

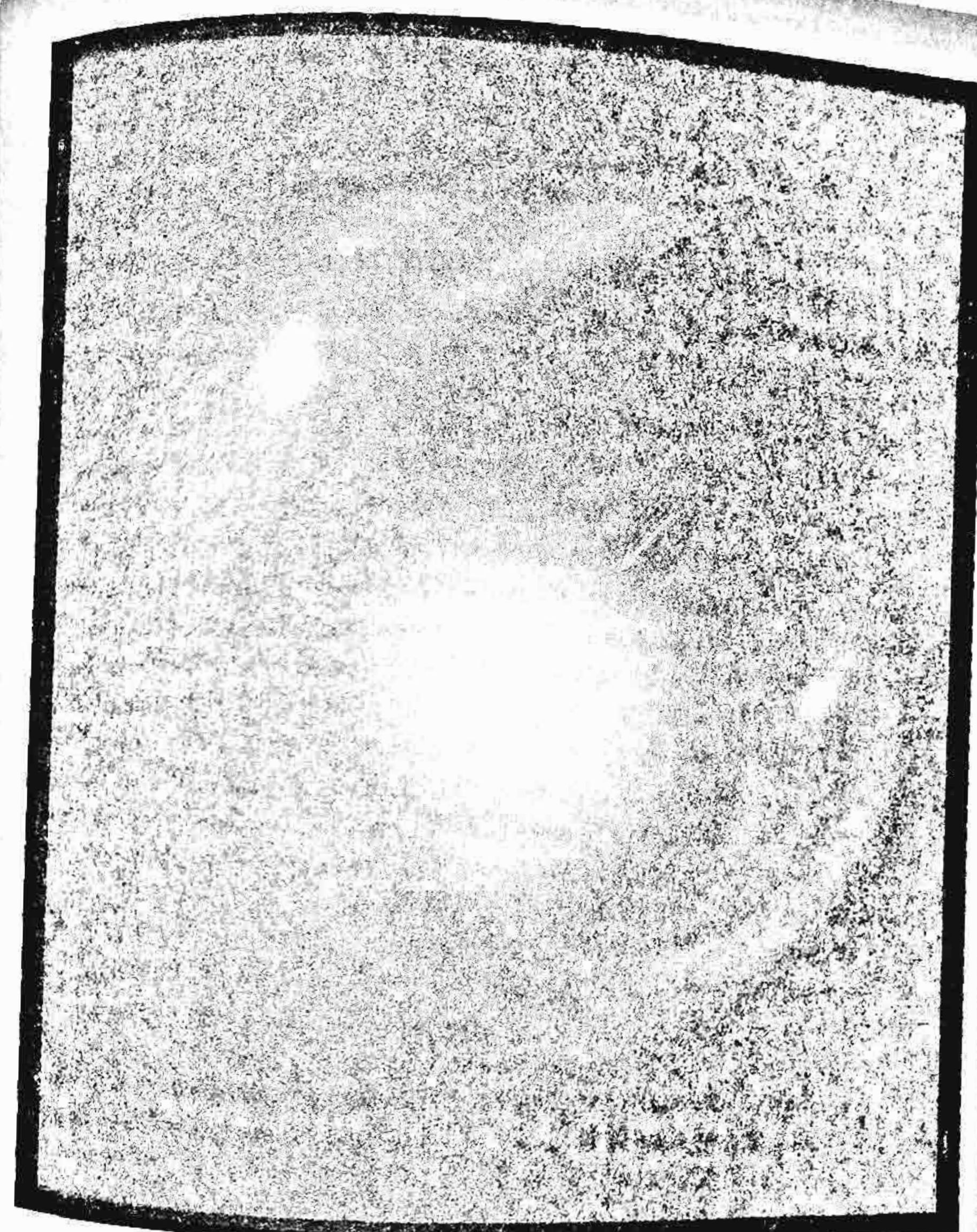


Imagen tomada por el telescopio espacial Hubble, donde se muestra un ejemplo de lente gravitatoria, con la galaxia que produce el efecto en el centro (señalada con una flecha), rodeada de un anillo exterior que corresponde a otra galaxia localizada detrás de la primera.

La historia de la astronomía es una historia de horizontes en retroceso.

EDWIN HUBBLE

al rojo porque si esas galaxias emiten parte de su luz en el azul, al llegar hasta nosotros esta se ha aproximado al rojo, es decir, ha aumentado su longitud de onda. Esto ocurre con todas las emisiones electromagnéticas de las galaxias. Y además, sucede que cuanto más lejos se observa, más desplazada al rojo se encuentra la radiación electromagnética detectada. La razón para que esto ocurra es que el espacio se está expandiendo. Dado que viaja por el universo, una luz emitida en el azul, al propa-

garse por un espacio en expansión, alargará su longitud de onda hacia el rojo. Si la luz fue emitida en un tiempo anterior, en una galaxia aún más lejana, habrá estado sometida durante más tiempo a la expansión y, por ello, su desplazamiento hacia

longitudes de onda más largas será mayor. Es sencillo encontrar una relación entre el desplazamiento al rojo de la luz recibida de las distintas galaxias que es posible observar y la velocidad con la que se están separando de nosotros. En efecto, cuanto mayor es el desplazamiento al rojo, mayor es la velocidad con la que se alejan. En cosmología se habla de *velocidad de recesión* para definir este tipo de velocidades inducidas por la expansión del propio espacio. Pero hay que tener cuidado con este tipo de razonamiento: se pueden encontrar galaxias muy lejanas que tienen su luz muy desplazada al rojo, y cuya velocidad de alejamiento respecto a nosotros parezca ser mayor que la de la luz. En realidad eso no tiene sentido; las galaxias no se alejan porque tengan algún movimiento que las haga alejarse, sino que es el propio espacio el que está creciendo en el proceso de expansión, por lo que hablar en términos de velocidades es confuso y los físicos solo lo hacen en términos de desplazamiento al rojo.

Insistiendo en este último punto, que es el más complicado de entender en lo referente a la expansión del universo, imaginemos que nos encontramos en un teatro repleto donde cada cual ocupa su asiento. Si por algún medio fuera posible expandir el teatro, como si la distribución de sus butacas fuera

elástica, se vería que la distancia entre nosotros y todos los demás aumenta de forma paulatina, y de hecho aumenta más conforme más separados estuviéramos al principio. Sin embargo, cada espectador sigue ocupando el mismo asiento, sin moverse de él, con lo que no se han desplazado unos respecto a otros, sino que solo han aumentado las distancias entre ellos. Si se preguntara a cualquiera de la sala qué es lo que observa a su alrededor, diría que todos los demás se están alejando de él, y eso mismo sería lo que responderían los demás, pues ninguno se hallaría en una posición central.

LA HISTORIA Y COMPOSICIÓN DEL UNIVERSO

Una vez descubierta la expansión del universo, la siguiente hipótesis podía plantearse fácilmente. Si el universo se está expandiendo, aumentando el espacio entre galaxias, en el pasado tuvo que ser más pequeño. Así que, invirtiendo la expansión, debería llegarse a la certeza de que el universo tuvo que tener un origen.

Pero si se lleva hasta el límite este argumento de que el universo tenía que ser más pequeño en el pasado, habrá que aceptar también que la energía que contiene se hallaba en un volumen más pequeño y por tanto su densidad (cantidad de energía por unidad de volumen) debía ser mayor que en la actualidad. Llegado al extremo deberá admitirse que toda la energía estuvo contenida en un punto.

Aquí se presentan dos ideas interesantes, una acertada y la otra errónea. Por un lado está la que sugiere que el universo tuvo un origen en un tiempo finito hacia el pasado, lo cual es correcto. Por otra parte, que toda la energía estuviera contenida en un punto en el pasado es algo erróneo por múltiples motivos. En primer lugar, porque olvidamos que durante la evolución del universo la expansión ha causado que las distancias aumenten, pero también que la energía disponible por unidad de volumen disminuya. Los físicos asocian la temperatura a esta densidad de energía, por lo que puede decirse que el universo se está enfriando, que es una forma de afirmar que hay menos densidad

REPRESENTACIÓN CONCEPTUAL DE LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

Entender el fenómeno de la expansión del universo y sus consecuencias desde el punto de vista del observador requiere una cierta abstracción. Para facilitar su comprensión se puede recurrir a un esquema topológico. Supongamos que tenemos un conjunto de galaxias, representadas mediante círculos, fijadas en las diversas posiciones (coordenadas) de una malla que simboliza el espacio; en dicha malla se ha dispuesto también nuestra galaxia, la Vía Láctea.

Solo se expande el espacio

Si el espacio se expande significa que la distancia entre ellas aumenta, aunque estén fijadas a los diferentes puntos de la malla. No se produce un movimiento de las galaxias, unas respecto a otras, sino solo la expansión del espacio. Las galaxias siempre están en el mismo punto de la malla.

Velocidad de recesión

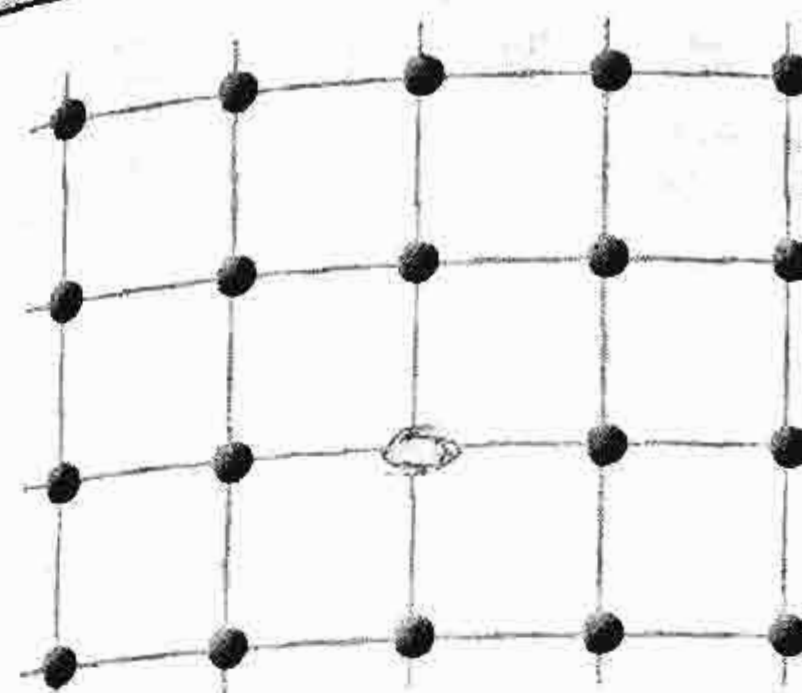
Debido a nuestro punto de vista, interpretamos que todas las galaxias se alejan de nosotros. Estamos ligados a nuestra galaxia, así que, desde nuestra perspectiva, la expansión del universo se traduce en que todas las galaxias se alejan de nosotros, y lo hacen tanto más cuanto más alejadas estén de nosotros. Hubble descubrió, y con posterioridad se confirmó, que la velocidad de recesión de una galaxia dependía linealmente de la distancia que nos separaba de ella, es decir, $v=Hd$, donde v es la velocidad de recesión, d es la distancia de separación y H es la constante de Hubble. Dicha constante cambia con el tiempo, pero su evolución es muy lenta, así que actualmente se llama *parámetro de Hubble* y tiene un valor de 67,3 km/s y por megapársec (el megapársec es una unidad de distancia cosmológica que equivale aproximadamente a unos $3,262 \cdot 10^6$ años luz o a $3,086 \cdot 10^{22}$ m).

No importa el punto de vista

Por supuesto, si nos situáramos en cualquier otra galaxia, veríamos exactamente lo mismo: todas las galaxias se alejarían de nosotros en la nueva posición. Y lo harían más rápido, en lo que a la velocidad de recesión se refiere, cuanto más alejadas de nosotros estuvieran. Es posible, pues, concluir que el universo no tiene centro, ya que todos los puntos son equivalentes en este sentido.

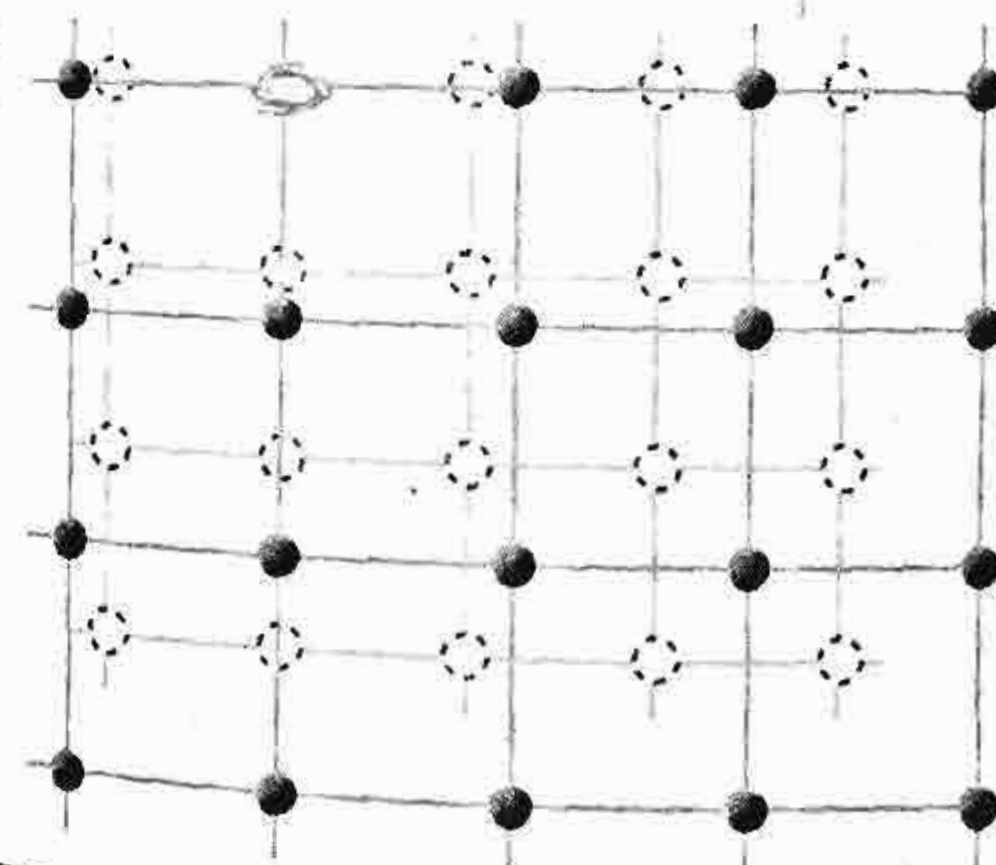
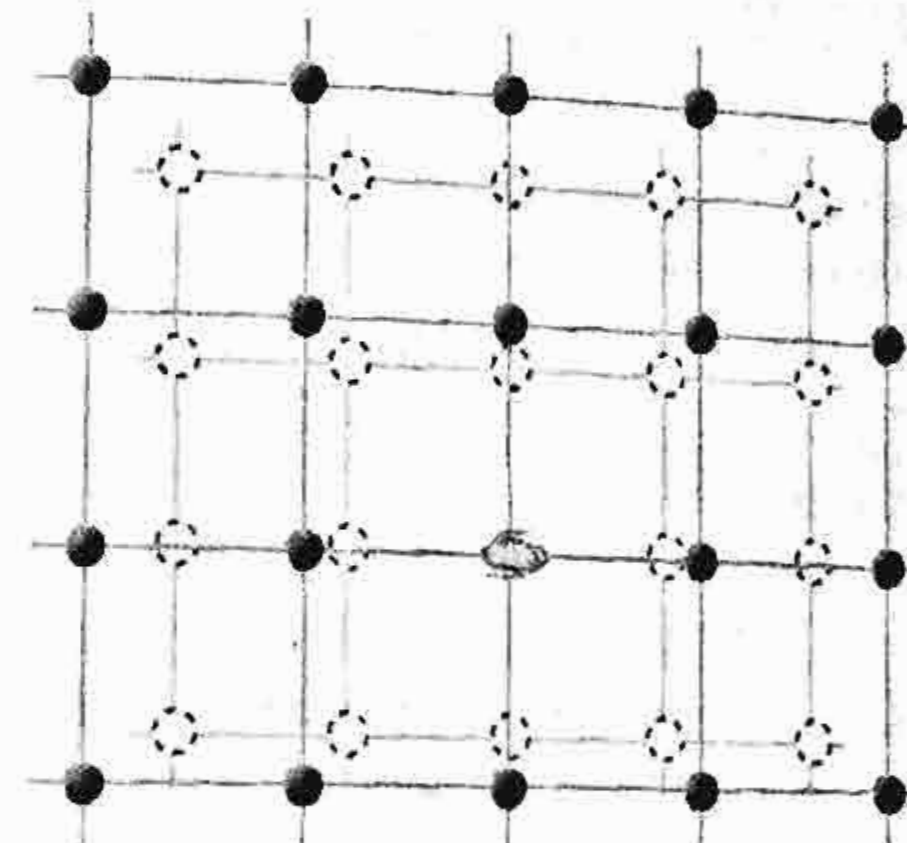
El universo no está contenido en nada

Contra qué se está expandiendo nuestro universo es otra cuestión que genera confusión. Eso es porque se tiene habitualmente la idea de que si algo se expande, un globo por ejemplo, aumentará su tamaño respecto al lugar que lo contenga. Pero en realidad el universo no funciona de este modo, puesto que si se considera que el universo es todo lo que existe, no estará contenido en nada y no se expandirá dentro de un espacio superior. Simplemente hay que aceptar que la distancia entre cualquier par de puntos que contenga aumenta con el tiempo.



Para entender la expansión del universo, imaginemos que nuestra galaxia, la Vía Láctea, se encuentra situada en un punto de una malla que simboliza el espacio. En los otros puntos se hallan otras galaxias, colocadas a cierta distancia entre sí.

La expansión del espacio, es decir, el estiramiento de la malla, provoca que aumenten las distancias entre las galaxias, sin que estas se muevan realmente de donde se encuentran.



El fenómeno se aprecia desde cualquier otro punto de la malla. Si nos trasladáramos a otra galaxia, veríamos también a las demás alejarse de nosotros, más rápido cuanto más lejos estuvieran de nuestra posición.

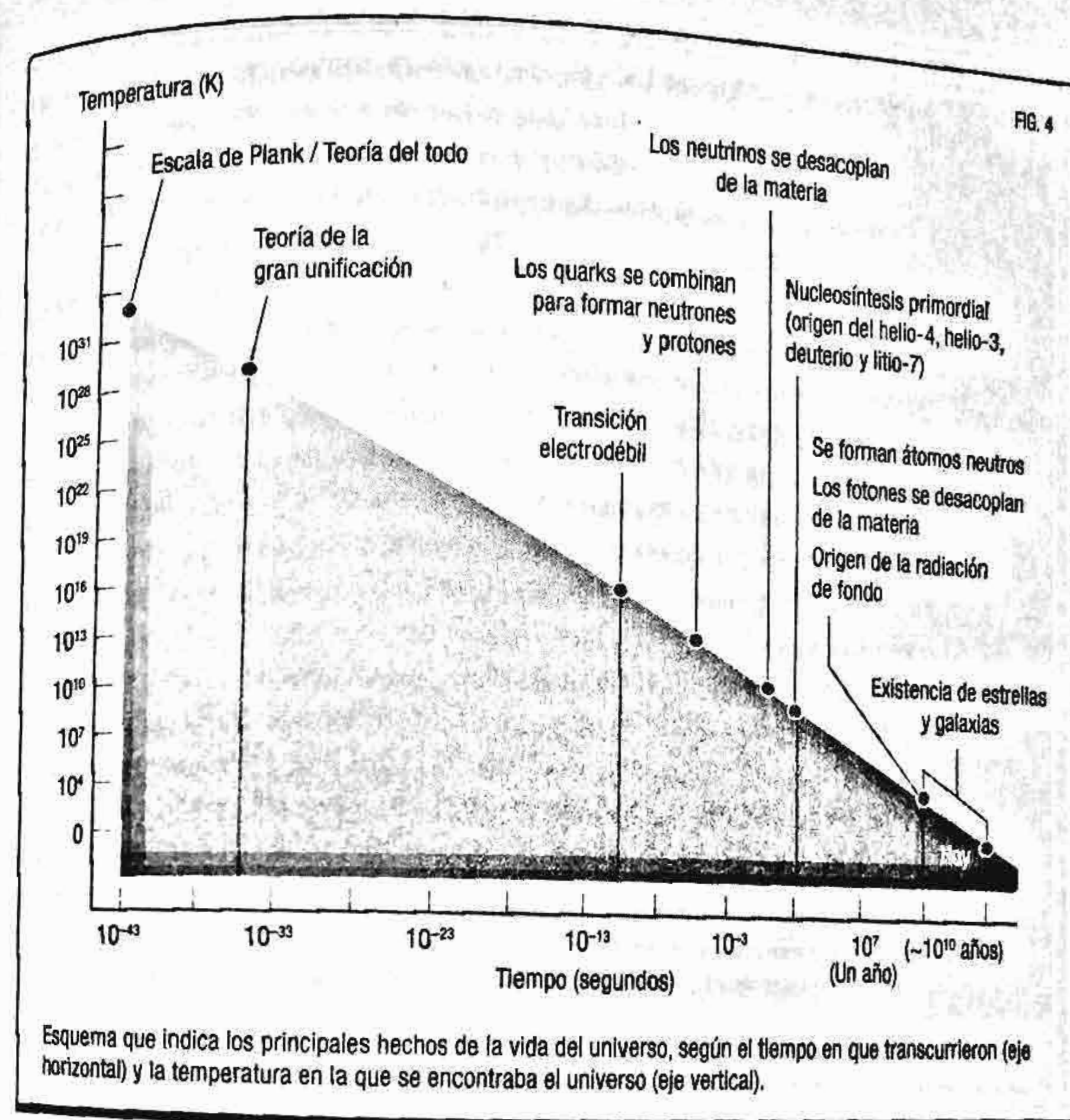
de energía. De modo que, si hacia el pasado el universo era más pequeño y la densidad de energía era mayor, entonces tendría una temperatura más elevada.

Pero al igual que cuando se aumenta la temperatura del agua líquida de 24 °C a 100 °C esta sufre un cambio de estado que la convierte en vapor, la energía y la materia del universo sufre cambios al tener mayor temperatura o mayor densidad de energía. Así que la materia actual a nuestro alrededor tiene las propiedades que tiene porque la energía disponible es muy pequeña y está en su configuración más estable. Si se le proporciona más energía, como se hace en los aceleradores de partículas, la materia puede explorar otros estados y presentar partículas que no se ven a nuestro alrededor. Por ejemplo, con el LHC, el acelerador más potente disponible en la actualidad, se pueden crear en regiones muy pequeñas densidades de energía que corresponden a temperaturas que el universo poseía tan solo una milmillonésima de segundo después de su origen. Con ello es posible estudiar cómo se comportaba la materia en esa fracción de tiempo tras el origen del universo.

Por otro lado, cuando se intenta definir un punto que contenga toda la energía del universo, nos encontramos con el problema de que nuestras teorías no funcionan, así que realmente no se puede describir ese punto que generó todo el universo observable. De hecho, muchas de las propiedades de ese punto se convierten en infinitos y eso carece de sentido desde el punto de vista científico.

Afortunadamente, la ciencia ha sido capaz de determinar la edad del universo con gran precisión y ha determinado que surgió hace 13800 millones de años, un origen que no involucró a ningún punto que lo contuviera todo. El estado actual de conocimiento lo vuelve todo más interesante, más natural, e involucra al vacío de una forma crucial.

La teoría estándar de la cosmología, la que se conoce con el nombre de *Big Bang* (o Gran Estallido), nos dice cómo evolucionó el universo desde justo después de su comienzo hasta el presente, pero no cómo se originó. Esta teoría hace predicciones muy precisas que hemos podido comprobar con observaciones.



De este modo es posible hacer una secuencia simplificada de la evolución del universo (figura 4) en base a la cosmología y la física de partículas que ha podido ser explorada experimentalmente:

1. Unos 10^{-43} segundos después del origen del universo, un intervalo extremadamente pequeño, cuando la temperatura era de 10^{32} K (el kelvin es la unidad de la escala absoluta de temperaturas, correspondiendo 0 K al cero absoluto, la mínima temperatura posible, que en grados centígrados se establece en los $-273,15$ °C), se supone que las interacciones que

ahora se observan —gravedad, electromagnetismo, débil y fuerte— formaban una única entidad, un único campo con partículas muy diferentes a las de ahora. En ese tiempo la gravedad se separó del resto de interacciones, que quedaron unidas en lo que se denomina *teoría de la gran unificación* (GUT, *Grand Unification Theory*). De hecho, no existe aún la teoría que permita definir esta etapa del universo y es imposible acceder a ella por observaciones o por experimentos.

2. Transcurridos 10^{-36} segundos, cuando la temperatura cayó hasta los 10^{27} K, la interacción unificada GUT se rompió en la interacción fuerte, y aparecieron los quarks y los gluones, así como la interacción electrodébil, que es una unificación de la interacción electromagnética y la interacción débil. En esta situación ninguna de las partículas que mediaban la interacción electrodébil tenía masa.
3. A los 10^{-12} segundos la energía disponible cayó a un valor en el que el campo de Higgs actuó dando masa a algunos bosones y el electromagnetismo se separó de la interacción débil. A partir de aquí, ya se tienen las cuatro interacciones que ahora observamos.
4. A partir de los 10^{-12} segundos la energía no era suficiente como para mantener los quarks libres y estos se confinaron dentro de protones y neutrones. Antes de ese momento los quarks y gluones tenían tanta energía disponible que podían estar libres formando una sopa denominada *plasma quark-gluon*. Este estado se está estudiando ahora de forma experimental.
5. Hasta un segundo después del origen del universo, las interacciones entre materia y neutrinos eran muy frecuentes porque estos tenían mucha energía a su disposición. Los neutrinos colisionaban una y otra vez con otras partículas interactuando aquí y allí. A partir del segundo de edad del universo la energía de los neutrinos ya no era suficiente

como para hacerlos interactuar con otras partículas y se propagaron en todas las direcciones de forma libre.

6. Pasados 100 segundos desde el nacimiento del universo la temperatura bajó hasta los 10^{11} K, permitiendo así que los protones y los neutrones, ahora menos energéticos, formasen núcleos atómicos ligeros a través de la interacción nuclear fuerte. Así que además de protones (núcleos de hidrógeno) se formaron núcleos con un protón y un neutrón (deuterio, un isótopo del hidrógeno), núcleos con dos protones y uno o dos neutrones (los isótopos del helio), y pequeñas cantidades de los siguientes núcleos más ligeros, el litio y el berilio. La materia estaba formada en gran parte por núcleos atómicos ligeros, de carga positiva, y electrones de carga negativa, formando una sopa neutra de partículas cargadas que viajaban libremente colisionando unas con otras. Por supuesto, entre los núcleos ligeros y los electrones se encontraban también fotones que colisionaban continuamente con estas partículas cargadas. La luz no se propagaba de manera libre sino que cualquier fotón cambiaba continuamente de dirección y energía.

7. Transcurridos 380 000 años desde su origen la temperatura del universo bajó hasta los 3 000 K. A esa temperatura la energía disponible para electrones y núcleos no les permitía moverse con libertad, así que se formaron los átomos. Los fotones presentes en el medio fueron capaces de viajar libremente, y el universo se hizo transparente a la luz.

Tras estos hechos, en lo que fue una historia muy activa al principio que se fue moderando conforme el universo se iba enfriando a causa de la expansión, se formaron galaxias y estrellas dando lugar al universo observable.

La teoría cosmológica estándar hace una serie de predicciones que tienen un gran respaldo observacional, y que van desde la distribución y estructura de las galaxias hasta la composición del universo. Por ejemplo, según dicha teoría, el universo

debe estar constituido por los siguientes elementos: tres cuartas partes de hidrógeno, aproximadamente una cuarta parte de helio, y pequeñas cantidades de elementos ligeros como el litio. Las observaciones cosmológicas confirman dicha composición. Elementos más pesados como carbono, oxígeno, hierro, etc., solo son una anécdota en el universo y no surgieron en el inicio del mismo sino en *explosiones supernova* donde se dieron las condiciones propicias para llegar a crear tales elementos químicos. Pero la gran predicción de la cosmología es que deberíamos estar recibiendo radiación electromagnética en forma de microondas desde todos los puntos en el cielo, la llamada *radiación cósmica de fondo*, y que esa radiación ha de encontrarse a una temperatura de alrededor de 3 grados por encima del cero absoluto. Esta radiación fue detectada por primera vez en 1964 por A. Penzias y R.W. Wilson —los cuales recibieron por ello el premio Nobel de Física en 1978—, y desde entonces se ha medido cada vez con más precisión, aportando así grandes avances en la comprensión de la estructura y evolución del universo.

LAS PRIMERAS SEÑALES

La gran herramienta de la cosmología actual es la radiación cósmica de fondo. Esta radiación es de tipo electromagnético y se liberó cuando el universo tenía unos 380 000 años. Describir cómo se originó y cuáles son sus características esenciales ha desempeñado un papel preponderante en la cosmología observacional.

Cuando el universo tenía 380 000 años de edad se encontraba en un estado en el que los núcleos positivos y los electrones tenían tanta energía que no formaban átomos. Dicho estado se denomina *plasma*, un tipo de fluido neutro que contiene las mismas cargas positivas que negativas, y en el que estas se mueven libremente a gran velocidad sin formar átomos. Por supuesto, en este momento también había radiación en forma de fotones, con una energía que les posibilitaba colisionar permanentemen-

te con las cargas y cambiar así su energía y su dirección de movimiento. Si este estado pudiera verse desde fuera, aparecería opaco, ya que la luz de su interior en forma de fotones no podría salir al exterior porque estaría continuamente rebotando con los constituyentes cargados del plasma neutro. Debido a la expansión del universo y su consiguiente enfriamiento, la energía disponible para esos constituyentes del plasma primordial disminuyó de tal forma que ya no tenían la suficiente para vencer la atracción entre los núcleos positivos y los electrones. Se produjo, por tanto, una transición en la que los núcleos capturaron los electrones y formaron los átomos más ligeros —hidrógeno, helio y pequeñas cantidades de litio y berilio, entre otros—. A partir de ese momento, el universo pasó a estar formado por entidades neutras y los fotones se pudieron propagar libremente ya que no tenían la energía suficiente para colisionar con los átomos recién formados. Esa radiación en forma de fotones estaba por todo el universo y se dirigía hacia todas direcciones.

Si esta imagen que se deriva de la teoría estándar de la cosmología es correcta debería recibirse pues una radiación procedente de todas las direcciones del cielo. Pero hay que recordar que los fotones recién liberados propagándose desde todos los puntos hacia todas las direcciones han sufrido una expansión desde su origen hasta nuestros días, lo que hace que su longitud de onda se haya estirado en el proceso. Según los cálculos cosmológicos iniciados por el astrónomo ucraniano George Gamow (1904-1968) y sus colegas Ralph Alpher (1921-2007) y Robert Herman (1931), en la actualidad la radiación cósmica debería recibirse en forma de microondas y su temperatura, una medida de su energía, ha de rondar los 3 grados por encima del cero absoluto, es decir, 3 K.

La tecnología del siglo XXI ha permitido detectar y hacer mapas de la radiación cósmica de fondo, constatándose que, efectivamente, la estamos recibiendo desde todos los puntos del cielo con una temperatura promedio de 2,71 K.

Pero ocurre que si esta radiación fuese totalmente homogénea y la energía recibida de ella fuese la misma en todos los puntos y todas las direcciones, no sería posible explicar que nuestro universo tenga estructuras como galaxias, cúmulos y supercú-

mulos. Pues, si la radiación fuese totalmente homogénea significaría que en el momento de su liberación la densidad de energía y materia del universo era también homogénea. En ese caso no habría posibilidad de explicar la aparición de estructuras como las galaxias porque para que se formase una galaxia debía existir previamente una región un poco más densa que el medio que la rodeaba, de forma que generara un poco más de gravedad que el medio y tuviera la capacidad de atraer hacia sí más materia y energía creciendo en el proceso, mientras el universo evolucionaba. Así pues, es necesario que la radiación cósmica de fondo tenga un valor promedio de la temperatura de 2,71 K pero también que existan minúsculas variaciones de temperatura, lo que significaría que en el momento de aparición de la radiación cósmica de fondo había pequeñas variaciones en la densidad de materia y energía del universo. En las zonas ligeramente más densas habría más fotones colisionando en ellas, y en las zonas ligeramente menos densas habría menos fotones encerrados en las mismas. Al liberarse la radiación en las zonas más densas aparecerían más fotones y en las menos densas menos, llegando hasta el presente como zonas un poco por encima de los 2,71 K o un poco por debajo, respectivamente.

Gracias a las misiones de satélites diseñados específicamente para estudiar estas variaciones de la temperatura en la radiación cósmica de fondo, como la misión WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*, o Sonda Wilkinson de Anisotropía de Microondas) de la NASA (2001) y la misión Planck de la Agencia Espacial Europea (2013), se han detectado en el cielo regiones un poco más calientes y un poco más frías que el promedio de 2,71 K. Lo asombroso es que esas variaciones oscilan entre tan solo una parte por cada diez mil hasta una parte por cada cien mil respecto al fondo de 2,71 K. Es decir, que ha sido posible medir diferencias de temperatura en el fondo de microondas de solo unas 20 millonésimas de grado kelvin. Esas mínimas variaciones permiten entender el origen de las estructuras del universo.

Las misiones como WMAP y Planck, que han medido las variaciones de temperatura de la radiación cósmica de fondo, pro-

porcionan mapas que son una proyección plana, como un mapa del globo terráqueo, de toda la esfera del cielo que nos rodea. Este mapa es el de la luz emitida cuando el universo solo tenía 380 000 años de edad.

Un aspecto importante de la radiación cósmica de fondo es el tamaño angular de las regiones calientes y frías. Cuando se observa un objeto celeste, por ejemplo el Sol o la Luna, su tamaño en el cielo se corresponde con un determinado ángulo de visión, el necesario para abarcar su diámetro completo. El Sol y la Luna, en particular, subtienden un ángulo visual de medio grado en el cielo, tan parecido que, desde nuestro punto de vista y a pesar de que el Sol es mucho más grande que la Luna, debido a que está mucho más lejos de nosotros que esta última, su tamaño en el cielo es casi igual y por ello se pueden observar los eclipses solares. Por su parte, las regiones más frías y más calientes de la radiación cósmica de fondo tienen un tamaño típico, respecto al promedio, de un grado, es decir, el doble que el Sol o la Luna vistos desde nuestra posición.

Los satélites diseñados para medir estas fluctuaciones en la temperatura del fondo cósmico de microondas han barrido el cielo detectando dicha radiación desde todas las direcciones. Sus detectores estaban preparados para efectuar dicho barrido con distintos ángulos de observación, desde muy pequeños ($0,3^\circ$) hasta grandes (90°), y el resultado ha sido que las mayores diferencias de temperaturas de una región a otra se dan en regiones de 1° . Para regiones mayores o menores las diferencias de temperatura son menos acusadas porque los promedios en estas regiones están más cercanos a la temperatura media del fondo de microondas. Esto permite hacer una gráfica donde en el eje horizontal se halla el tamaño angular con el que se ha barrido el cielo en la detección del fondo cósmico, y en el eje vertical las diferencias de temperatura respecto al promedio del propio fondo. Esa gráfica se conoce entre los cosmólogos con el nombre de *espectro de potencias del fondo cósmico* y es una parte esencial en nuestro entendimiento del cosmos.

Una vez presentada la radiación cósmica de fondo de forma cualitativa, se tiene por fin un punto de partida para comprobar

LA OBSERVACIÓN DE LA RADIACIÓN CÓSMICA DE FONDO

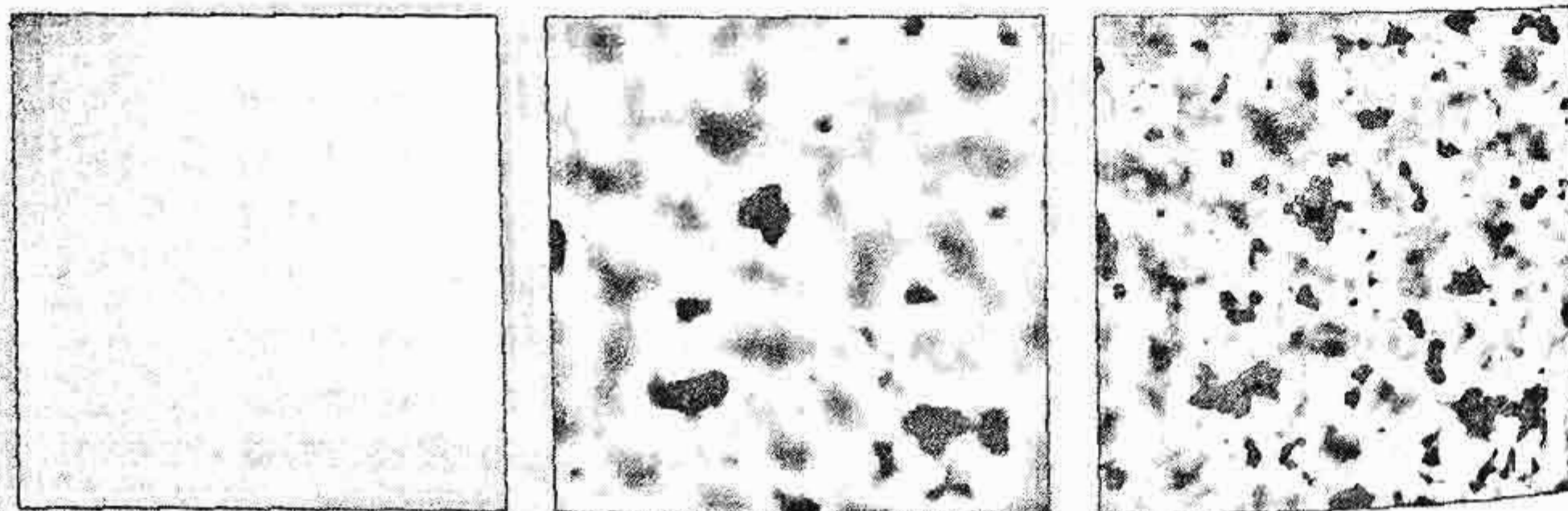
Para entender correctamente la radiación cósmica de fondo hay que pensar que observamos el universo desde su interior, que hemos evolucionado con él, y que por tanto no somos observadores externos. Imaginemos que es posible retroceder hasta la época del plasma, antes de la formación de los primeros átomos, en la misma posición que ahora ocupamos en el universo. Lo que observaríamos es justamente un plasma de partículas cargadas positivamente, los núcleos ligeros, y electrones que se moverían libremente colisionando de manera continua. Además, veríamos fotones de alta energía colisionando con esas partículas cargadas y cambiando de dirección con frecuencia (figura 1). No recibiríamos luz desde ningún sitio, ya que estaríamos inmersos en un medio opaco.

El gran flash

Cuando el universo se expandió lo suficiente como para que los núcleos y los electrones formaran los átomos neutros, 380 000 años después del origen, desde todos los puntos empezaron a propagarse fotones en todas direcciones, dependiendo de cómo se estuvieran moviendo en el momento de formación de los átomos (figura 2). Así, si hubiésemos estado allí habríamos observado un gran destello de luz llegando a nosotros desde todos lados. Evidentemente, si nos hubiésemos puesto en cualquier otro punto habríamos visto exactamente lo mismo. La temperatura de esa radiación era de unos 3000 K.

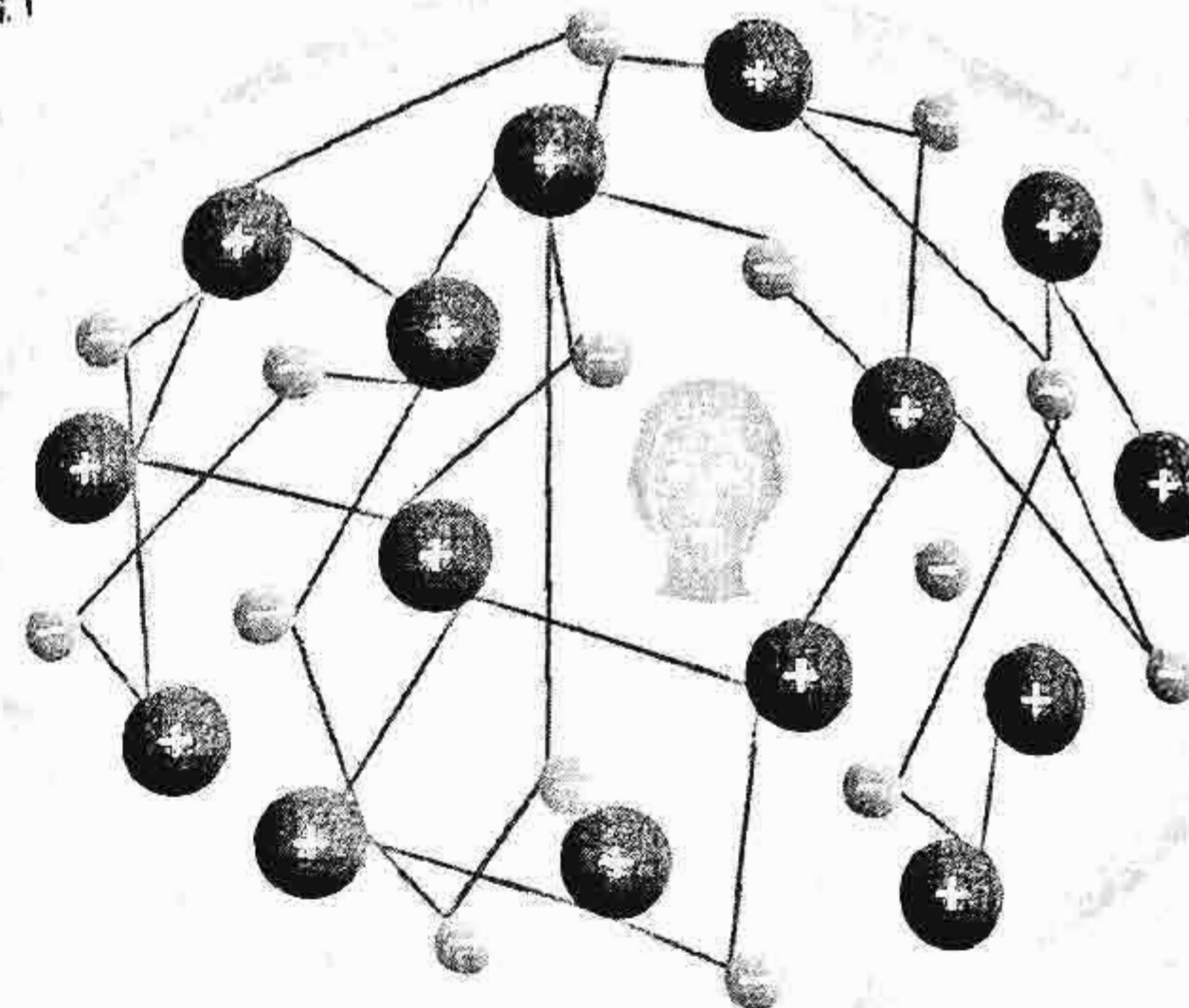
Desviaciones fundamentales

La distribución de materia y energía debía haber sido casi perfectamente homogénea, pero existían pequeñas desviaciones más o menos densas respecto al promedio. De las regiones más densas salieron más fotones, y de las menos densas, menos. El universo se ha ido expandiendo desde ese momento hasta nuestros días y, por lo tanto, la radiación nos llega con una longitud de onda larga, en la región de las microondas, con una temperatura de 2,71 K, valor predicho por la teoría estándar de la cosmología. Y además se observan variaciones de temperatura en la radiación, debido a que hay regiones de las que nos llegan más fotones que de otras, de una parte por cada 10 000 a una parte por cada 100 000 del promedio de temperatura.



De izquierda a derecha, así veían la radiación de fondo, cada vez con más precisión, los satélites COBE, WMAP y Planck.

FIG. 1



En la época opaca del plasma veríamos núcleos ligeros con carga positiva y electrones con carga negativa moviéndose libremente, colisionando de forma continua entre ellos y con fotones de alta energía.

Unos 380 000 años después del origen, núcleos y electrones comenzaron a formar átomos neutros, y empezaron a propagarse fotones dando forma a un gran flash de luz.

Núcleo
Electrón
Fotón

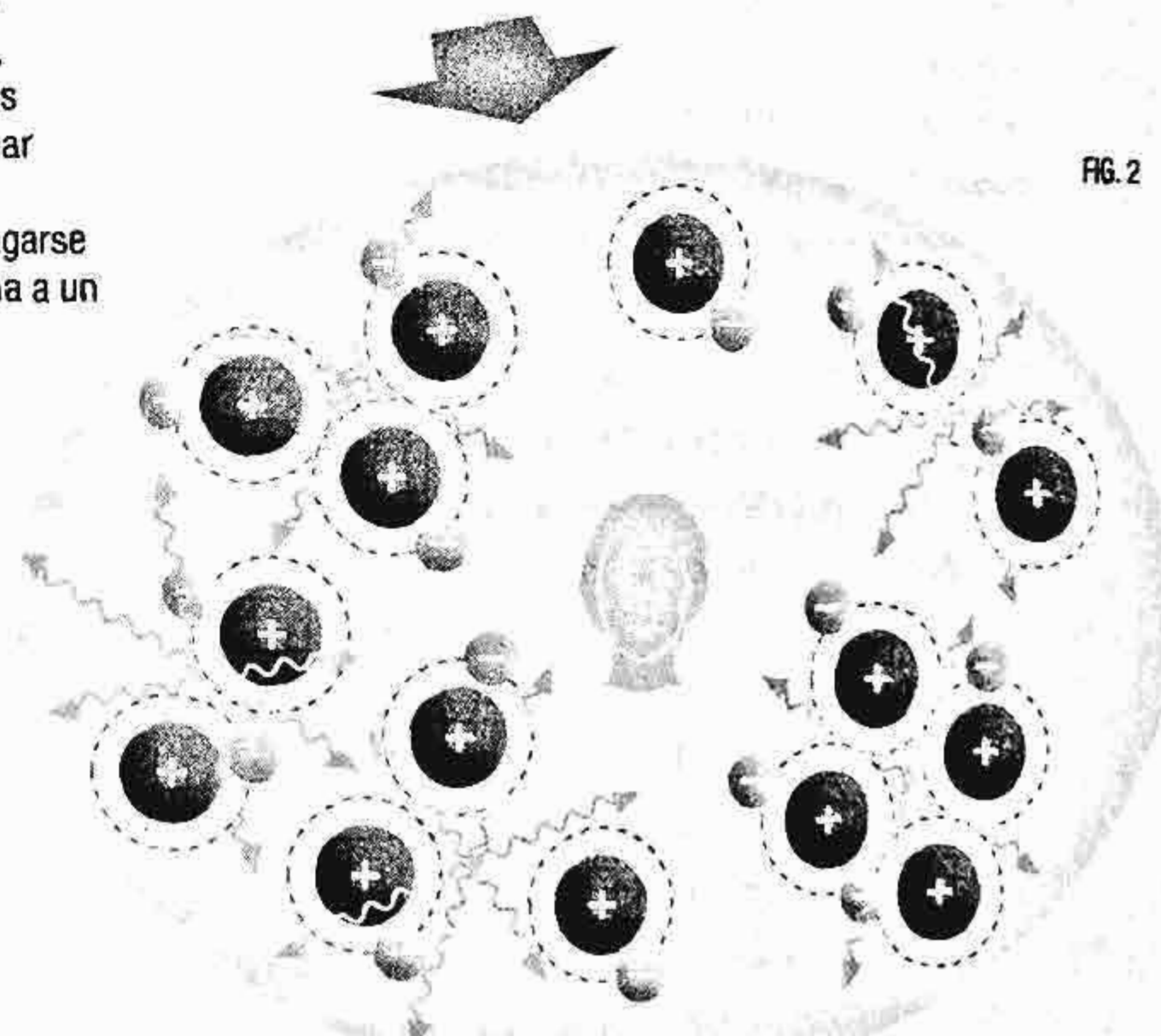


FIG. 2

que muchas de sus características están relacionadas con el vacío.

GEOMETRÍA DEL UNIVERSO Y DENSIDAD DE ENERGÍA

El gran desarrollo de la cosmología en el siglo xx fue posible gracias a la formulación de la teoría de la relatividad general, que permitió estudiar el universo como un todo. La relatividad general nos enseña que la gravedad no es más que la manifestación de la geometría del espacio-tiempo, geometría que responde ante la presencia de las distintas energías y flujos de las mismas correspondientes a los distintos campos físicos de materia o interacción.

El primero en aplicar la relatividad general a todo el universo fue el propio Einstein. Sin embargo, debido a sus ideas preconcebidas que le llevaban a pensar que el universo debería ser eterno y estático, su primer modelo tuvo que desecharse. Einstein partía de otro presupuesto: el universo a muy gran escala ha de ser *isótropo* —tiene las mismas propiedades en todas las direcciones— y *homogéneo* —tiene las mismas propiedades en todos los puntos—. Esta idea parece antinatural porque a nuestro alrededor se aprecian muchas estructuras, como estrellas, planetas, galaxias, cúmulos, etc. El motivo de considerar esta *isotropía* y esa homogeneidad del universo fue simplemente porque simplificaban las ecuaciones y facilitaban mucho su resolución. Hoy día se sabe que esa idea era acertada, pues a muy gran escala el universo presenta características isotrópicas, rasgo que ha sido confirmado por la radiación cósmica de fondo. Dado que mirar hacia más lejos en el universo revela cómo era este en el pasado, al mirar la radiación cósmica de fondo se puede ver cómo era el universo cuando solo tenía 380 000 años de edad y era mucho más denso, caliente y pequeño que en la actualidad. Que esa radiación sea homogénea, en temperatura, en una parte por cada diez mil a una parte por cada cien mil nos dice que así de homogénea era la densidad de energía en el momento en el que fue emitida.

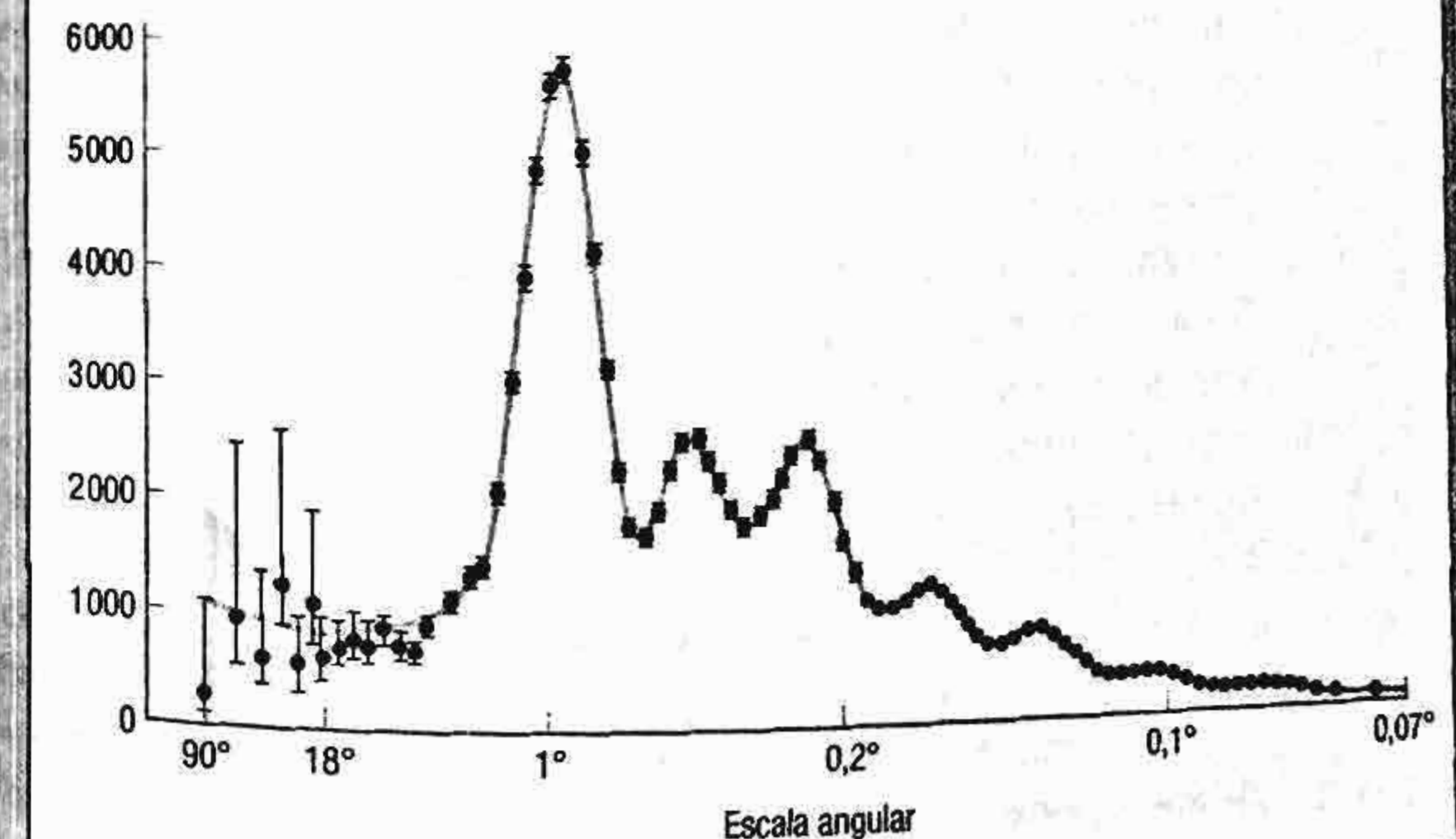
EL ESPECTRO DE POTENCIAS DEL FONDO CÓSMICO

A partir del mapa de fluctuaciones de la temperatura del fondo cósmico se puede afrontar el estudio de dichas fluctuaciones dependiendo del tamaño angular del cielo en el que se esté haciendo la observación de las mismas. Esto proporciona una gráfica llamada espectro de potencias que relaciona las diferencias de temperatura de una región a otra, respecto al promedio del fondo, con el tamaño de la región de observación. De esta gráfica solo interesa la magnitud de la fluctuación, es decir, cuán grande es la diferencia frente a los 2,71 K del promedio del fondo. En ella se grafica el cuadrado de la magnitud de la fluctuación para evitar el signo asociado a si está por encima o por debajo, ya que al tomar cuadrados el resultado siempre es positivo. En el eje vertical se ponen las fluctuaciones de la temperatura en microkelvins ($1\mu\text{K}=0,000001\text{ K}$) al cuadrado y en el eje horizontal la escala angular del tamaño de la región de observación.

Las mayores diferencias de temperatura

Lo que se aprecia en esta gráfica es que las mayores diferencias en la temperatura se dan para tamaños angulares de 1° , el tamaño típico de las regiones frías y calientes en el fondo de microondas. Por lo tanto, cuando se barre el cielo con esa escala se irán encontrando zonas frías y calientes dando lugar a grandes diferencias relativas de temperatura. Así, en dicha gráfica existe un gran pico justo en el ángulo de 1° ; luego se encuentran dos menos pronunciados para ángulos menores de 1° y después una caída para ángulos muy pequeños, así como una caída pronunciada para ángulos que van desde 1° hasta 90° de observación.

Fluctuaciones de temperatura (μK^2)



La realidad es meramente una ilusión, si bien una muy persistente.

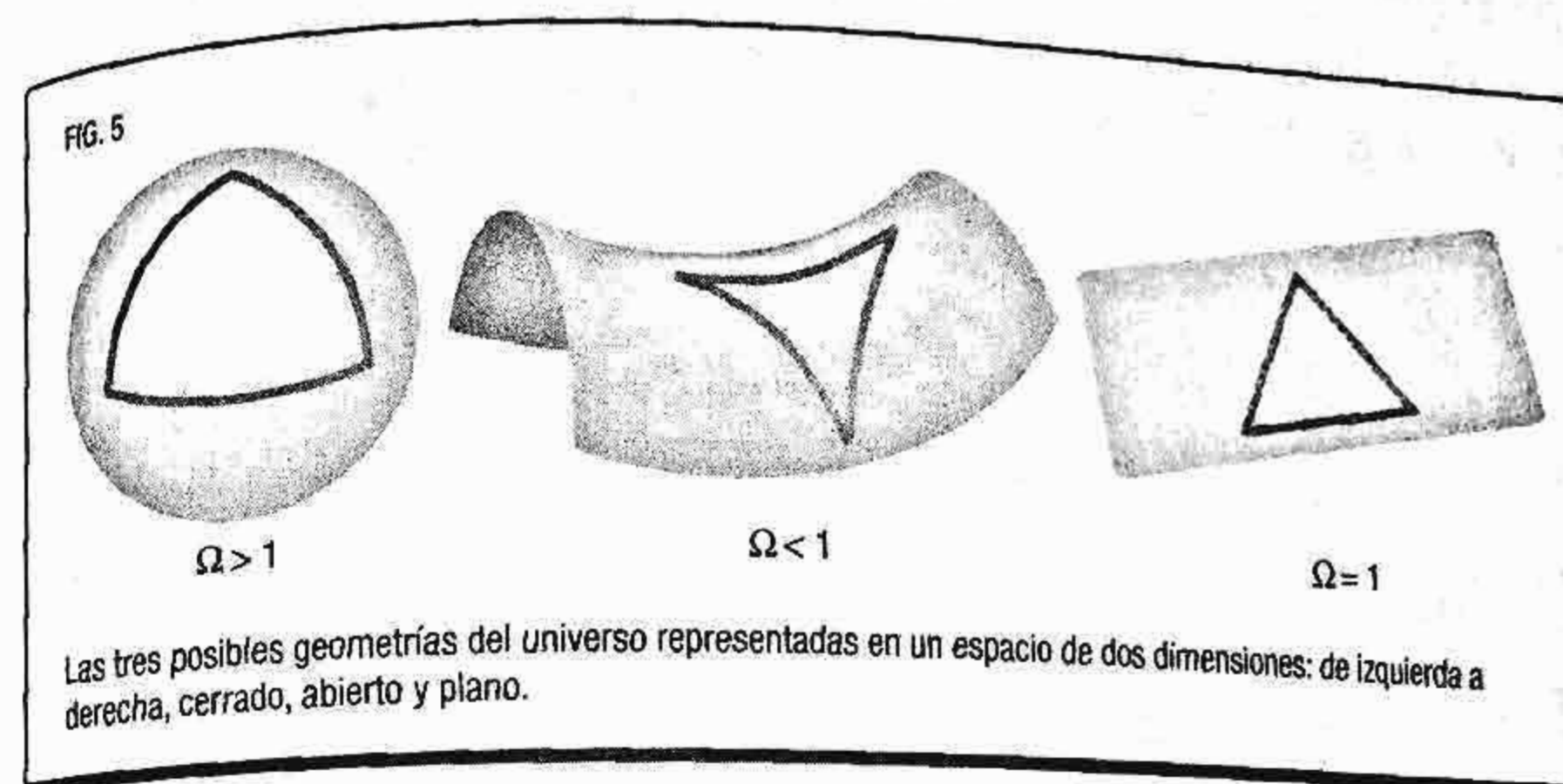
ALBERT EINSTEIN

Si se supone que el universo a muy gran escala es isótropo y homogéneo, la relatividad general postula que hay tres posibles geometrías para el mismo: el universo cerrado, plano o abierto.

Un universo cerrado es aquel que tiene un origen, llega a un tamaño máximo y vuelve a colapsar gravitatoriamente. El universo abierto, por su parte, se expande de manera indefinida. Por último, el universo plano es un caso especial, un caso límite entre el universo cerrado y el universo abierto (figura 5).

Desde el punto de vista de la geometría, dos rayos de luz paralelos lanzados en un universo cerrado tendrían una trayectoria cerrada y volverían al punto desde el que fueron emitidos tras un tiempo que dependerá del tamaño máximo que pueda alcanzar dicho universo. Además, en un universo cerrado, si se toma un triángulo lo suficientemente grande se observaría que la suma de sus tres ángulos es mayor de 180° . En el caso del universo abierto, dos rayos de luz emitidos en paralelo se separarían continuamente y un triángulo lo bastante grande tendría una suma total de ángulos menor de 180° . En cambio, para el universo plano dos rayos de luz emitidos en paralelo continuarían así siempre y cualquier triángulo que se dibuje en él tendría una suma de ángulos igual a 180° , es decir, se verificaría la geometría clásica.

Todos estos argumentos geométricos están ligados a la densidad de energía presente en el universo en el momento de su origen. Si la densidad de energía es muy elevada su gravedad será tan intensa que podrá frenar la expansión inicial y revertirla, volviendo a colapsar el universo y dando lugar a una geometría cerrada. Por el contrario, si la densidad de energía es muy pequeña, la gravedad que genera no será suficiente para afectar a la expansión y esta seguirá para siempre dando lugar a un universo abierto. En el caso del universo plano la situación es más delicada porque solo hay un valor posible de la densidad de energía que consigue que el universo sea plano: a esta densidad de energía se la denomina *densidad crítica*, ρ_{crit} .



Por lo tanto, una tarea importante en cosmología consiste en determinar el valor de la densidad actual del universo, que se representa por ρ_{ahora} . De hecho, para simplificar la discusión, se puede definir una magnitud denominada *omega*, Ω , que no es más que el cociente entre el valor de la densidad actual del universo y la densidad crítica necesaria para que sea plano, $\Omega = \rho_{ahora} / \rho_{crit}$. Así, si $\Omega > 1$ el universo será cerrado, si $\Omega < 1$ el universo será abierto y si $\Omega = 1$ el universo será plano.

Medir la densidad del universo se puede hacer de muchas formas. Es posible, por ejemplo, medir la cantidad de energía de los objetos cosmológicos a partir del brillo que tienen. También es viable estudiar la gravedad que generan por diversos métodos, como el efecto de lente gravitatoria, y a partir de la gravedad estimar la energía del sistema bajo estudio. Además, la distribución de fluctuaciones de temperatura en la radiación cósmica de fondo depende de la densidad de energía total del universo. En definitiva, se puede obtener un valor de Ω , si bien el universo nos deparará varias sorpresas respecto a este valor y su geometría.

EL UNIVERSO ES PLANO

Que nuestro universo es plano, tal y como indican numerosas observaciones cosmológicas cada vez más precisas, es sin duda

PLANCK, EL OBSERVADOR DEL PASADO MÁS REMOTO

Espejo principal, de
1,5 m de diámetro

Los instrumentos a bordo de la nave captan radiación en dos frecuencias distintas, baja y alta. El *Low Frequency Instrument* (LFI) transforma la radiación de microondas de baja frecuencia en voltaje eléctrico, gracias a un amplificador. El *High Frequency Instrument* (HFI) convierte la radiación de alta frecuencia en calor, que es medido por un termómetro electrónico.

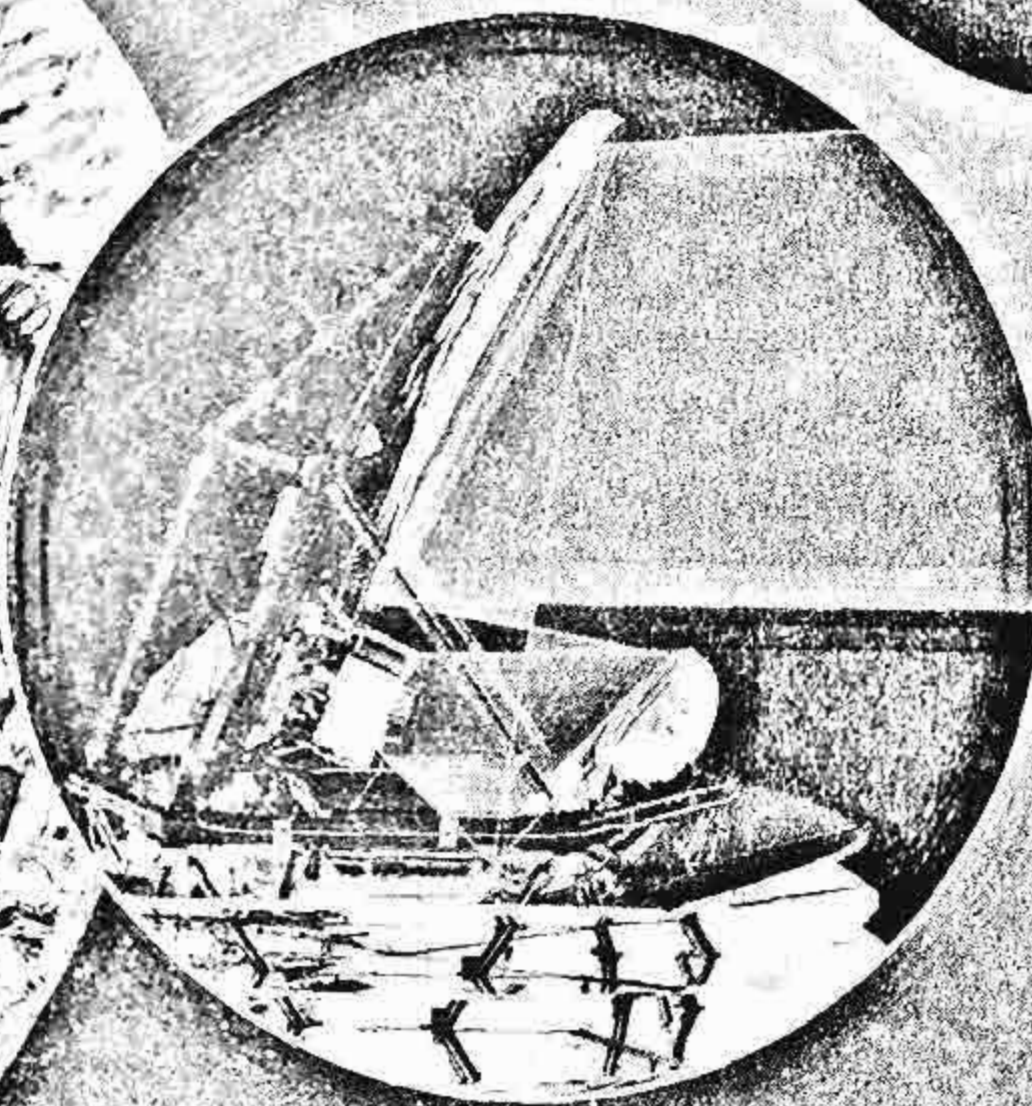
Instrumentos para
captar radiación

Escudo protector

Espejo secundario

El **CARTÓGRAFO DE LOS CIELOS PRESENTES** fue lanzado el 14 de mayo de 2009 con un cohete Ariane 5. El observatorio Planck de la Agencia Espacial Europea obtuvo el mapa más detallado y preciso hasta la fecha del fondo cósmico de microondas. Para ello fue colocado en una posición fija entre el Sol y la Tierra, desde donde escuchaba todo el cielo en dos ocasiones. El Planck mejoró enormemente las observaciones de sus antecesores, el COBE y el WMAP de la NASA, y logró confirmar las proporciones entre la materia normal, la materia oscura y la energía oscura, así como la estructura geométrica del universo.

Sistema de refrigeración



Esta es la radiación de fondo cósmico localizada por los dos espejos con los que está equipado el satélite.

Módulo de servicio

Panels solares

MISSION COMPLETED
Sus dos sensores, enfriados con helio para no superar una temperatura de 0,1 grados por encima del cero absoluto, midieron de forma continua la intensidad y la polarización de los fotones en las longitudes de onda desde las microondas hasta el infrarrojo. Su trabajo finalizó en enero de 2012, cuando se agotó su refrigerante. Una vez completada la tarea, el Planck fue enviado a una órbita alrededor del Sol. Su transmisor fue desconectado el 23 de octubre de 2013, para evitar interferencias con otros vehículos espaciales.

una de las afirmaciones más sorprendentes de toda la cosmología. Entender por qué es una sorpresa, permitirá constatar que a partir de aquí es el vacío cuántico el que toma las riendas de la historia.

Si se asume que nuestro universo es plano, porque así lo dicen las observaciones, ello supone un problema porque solo hay una densidad de energía del universo que dé lugar a esa geometría concreta. Si la densidad en su origen hubiese sido un poco mayor o un poco menor el universo habría sido cerrado o abierto. Por lo tanto, es difícil entender por qué nuestro universo tiene justamente esta geometría especial, la geometría plana. Si nuestro universo hubiera empezado solo con un poco más de energía que la necesaria para tener la densidad crítica, la gravedad generada habría frenado la expansión y por lo tanto el universo recolapsaría aumentando con ello la densidad y alejándola del valor crítico. Aumentaría la densidad porque el volumen sería menor debido a la acción de la gravedad, que sería capaz de frenar y revertir su expansión. En el caso de que el universo hubiera tenido en su origen un poco menos de energía que la necesaria para tener la densidad crítica, la expansión no habría sido frenada por la gravedad y, por lo tanto, el volumen se habría incrementado mucho, haciendo que la densidad de energía se redujera rápidamente, alejándose del valor crítico de la misma. En cualquiera de los dos casos la formación de galaxias estaría comprometida porque o bien el universo recolapsaría pronto y no podría vivir tanto como para formarlas o bien la expansión alejaría tanto la materia y la energía que impediría formar estructuras. Y lo peor de todo, la energía inicial del universo tuvo que ser tal que la densidad inicial no debería de diferir de la crítica en un factor mayor de 10^{-62} , una cantidad ridículamente pequeña. Lo cierto es que en física no gustan estos problemas denominados de ajuste fino, es decir, que aparezca un número cuya variación en una cantidad tan asombrosamente pequeña tenga consecuencias tan desastrosas para nuestro universo. Por tanto, encontrar un mecanismo que explique por qué nuestro universo empezó con una densidad de energía tan ajustada al caso crítico ha sido uno de los grandes problemas de la cosmología contemporánea.

La segunda fuente de sorpresas que tienen su origen en que nuestro universo se haya revelado plano tiene que ver con la determinación de la densidad de energía y materia ρ —o, en unidades de densidad crítica, Ω —. Cuando los astrónomos y astrofísicos se pusieron a medir la cantidad de materia y energía que contenía nuestro universo, en lo que corresponde a la que conocemos como *materia ordinaria*, descubrieron que $\rho_{\text{ord}} = 0,049 \rho_{\text{crit}}$. Con esos datos en la mano se podía concluir que $\Omega < 1$ y consecuentemente que el universo era abierto. Pero nuevos fenómenos aportaron nuevos datos. Así, se descubrió que en el universo hay mucha más masa de la que se ve, materia que se supone está compuesta por partículas que no emiten o interactúan con la radiación electromagnética, por lo que se la ha denominado *materia oscura*.

Todavía no es posible decir qué es la materia oscura pero se puede asegurar que está ahí porque sus efectos gravitatorios son perceptibles. Las pruebas son múltiples. Sin materia oscura no se explica el movimiento de rotación de las galaxias; las partes exteriores de las que se observan tienen una velocidad de rotación alrededor de su centro que es mucho más alta de la que les correspondería por la masa visible, así que eso indica que hay más masa en una forma de materia que no se aprecia. Además, los cúmulos de galaxias, asociaciones de un gran número de cuerpos galácticos por su atracción gravitatoria, no serían estables si no hubiera al menos 50 veces más masa de la que se determina por el brillo galáctico. También, gracias al efecto de lente gravitatoria, las imágenes observadas necesitan pasar por regiones donde haya mucha más masa para lograr la deformación que presentan, y por lo tanto la curvatura del espacio debe ser mayor que la que se puede asignar por su brillo. Y por supuesto, el tamaño y distribución de las regiones frías y calientes en la radiación cósmica de fondo solo se puede explicar si hay mucha más materia de la que podemos ver. En base a todo lo anterior, todos los cálculos indican que la densidad de energía debida a la materia oscura alcanza el valor de $\rho_{\text{osc}} = 0,268 \rho_{\text{crit}}$. Sumando las densidades de materia ordinaria y materia oscura el valor de la densidad sube hasta un $0,317 \rho_{\text{crit}}$, un valor mucho

más alto, pero bajo el cual Ω sigue siendo menor que uno y nuestro universo continúa pareciendo un universo abierto.

No obstante, el universo guardaba aún un as en la manga. En el año 1998 se iniciaron dos proyectos científicos, el *Supernova Cosmology Project* (Proyecto de Cosmología por Supernovas) y el *High-Z Supernova Search Team* (Equipo de Búsqueda de Supernovas de Alto Desplazamiento al Rojo —que se representa por Z—), con la intención de medir lo que había descubierto el telescopio Hubble pero en galaxias cada vez más lejanas y por lo tanto situadas más en el pasado. Lo que todo el mundo esperaba encontrar es que, debido a que en el pasado el universo era más denso y por tanto la gravedad más intensa, la expansión fuese más rápida entonces de lo que lo es en la actualidad, para compensar esa mayor intensidad gravitatoria que intentaría frenar la expansión. Pero lo que se descubrió fue justo lo contrario: que la expansión en el pasado fue más lenta que actualmente. Esto significa que el universo se está expandiendo y lo está haciendo de forma acelerada. Los jefes científicos de los dos proyectos mencionados, Saul Perlmutter y Adam Riess, recibieron el premio Nobel de Física en 2011 por el descubrimiento de la *expansión acelerada del universo*.

La cuestión que surgió en ese mismo momento fue: ¿qué estaba produciendo esa aceleración de la expansión? Y la respuesta parece que solo puede venir de un sitio, del propio vacío. Este vacío aporta energía al universo y por lo tanto contribuye a la densidad de energía total, pero con un raro comportamiento gravitatorio: la energía del vacío produce repulsión gravitatoria en lugar de atracción, de manera que el universo se expande aceleradamente en contra de la gravedad atractiva. El caso es que para que la expansión acelerada observada en los experimentos pueda explicarse se necesita una densidad de energía del vacío con un valor de $\rho_{\text{vac}} = 0,683 \rho_{\text{crit}}$. Además, este valor de la energía del vacío es justamente el que se precisa para justificar las propiedades de la radiación cósmica de fondo que se observa a nuestro alrededor. Esta energía del vacío es la que se conoce como *energía oscura*.

Si ahora se suman todas las contribuciones a la densidad de energía es fácil observar que nuestro universo tiene una densi-

LAS GEOMETRÍAS DEL UNIVERSO SEGÚN LA RADIACIÓN CÓSMICA

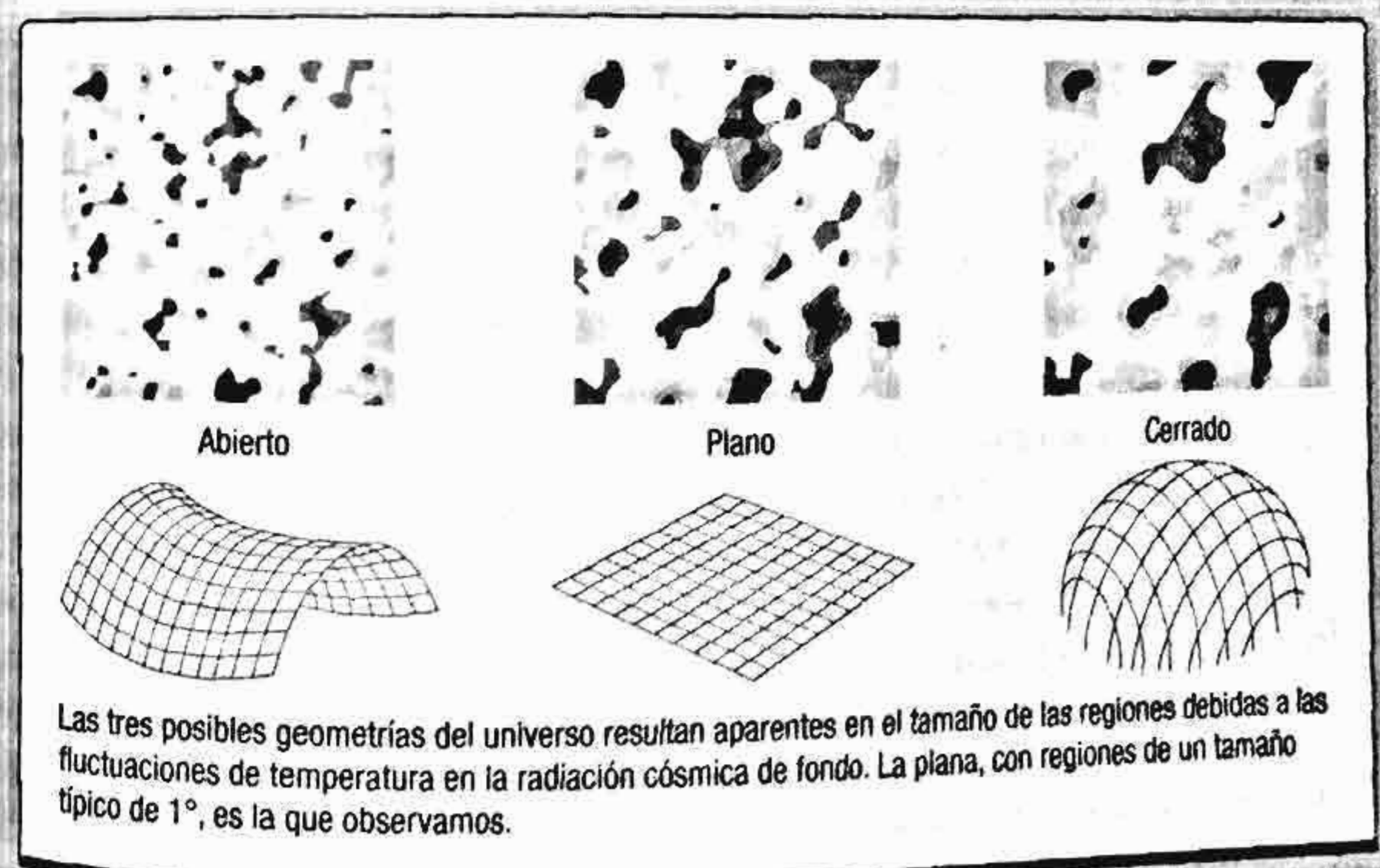
La radiación cósmica de fondo es sin duda la herramienta más poderosa disponible para estudiar la composición, estructura y evolución del universo. A partir de su análisis ha sido posible intentar determinar cuál de las tres posibles geometrías de nuestro universo se aplica a él.

Geometría en función del tamaño de las regiones

Del desarrollo de los modelos teóricos cosmológicos se obtiene que si nuestro universo es plano y contiene materia ordinaria, materia oscura y energía oscura en las proporciones $\rho_{\text{ord}} = 0,049 \rho_{\text{crit}}$, $\rho_{\text{osc}} = 0,268 \rho_{\text{crit}}$ y $\rho_{\text{vac}} = 0,683 \rho_{\text{crit}}$, respectivamente, las regiones debidas a las fluctuaciones más frías o más calientes en la radiación cósmica de fondo deberían tener un tamaño típico de 1° , que es justamente lo que se detecta. Si el universo fuera abierto dichas regiones tendrían un tamaño menor y en el caso de un universo cerrado serían mayores, como se aprecia en la figura.

El primer pico del espectro de potencias

Respecto al espectro de potencias de la radiación cósmica de fondo, es la posición de su primer pico la que está relacionada con la geometría del universo y, consecuentemente, con la densidad de energía del mismo. Pues bien, las observaciones constatan que el primer pico está justamente en 1° , que es lo que corresponde a un universo plano. La posición de los siguientes picos y sus alturas relativas depende del contenido de materia y energía oscura. Existen simuladores en la red donde se pueden modificar los valores de las densidades de la materia ordinaria, la materia oscura y la energía oscura para ver cómo se modificaría la radiación cósmica de fondo.



dad correspondiente a ρ_{crit} , $\Omega = 1$. Por tanto, nuestro universo es plano.

En un universo plano, además, se constata una curiosa propiedad: la energía total puede ser exactamente cero. Hasta ahora se ha afirmado que la densidad de energía del universo coincide con la densidad crítica, como han demostrado las observaciones cosmológicas. Esta densidad crítica tiene un orden de magnitud de 10^{-30} g/cm³. Entonces, ¿qué significa que la energía puede ser cero? Lo que implica esta afirmación es que se ha dejado fuera un componente esencial en el universo, la gravedad. Los sistemas que están sujetos a atracción gravitatoria tienen una energía asociada a su interacción gravitatoria y esta energía gravitatoria es negativa. La razón es fácil de entender en términos de gravedad newtoniana si se asumen dos ideas. La primera es que si se tienen dos cuerpos separados por una distancia infinita, estos no se sienten gravitatoriamente entre sí, ya que la gravedad varía disminuyendo con el cuadrado de la distancia. En esa situación se puede decir que el sistema de los dos cuerpos posee una energía gravitatoria igual a cero. El segundo punto que hay que asumir es que cualquier sistema evoluciona de forma espontánea hacia estados de menor energía. Por ejemplo, si se toman dos cuerpos separados por una distancia infinita, podrá asignárseles una energía gravitatoria nula. Pero si se perturba el sistema acercándolos ligeramente entre sí, comenzarán a sentir la presencia gravitatoria del otro, acercándose sin tener que actuar sobre ellos, y haciéndolo de forma espontánea. Por lo tanto, estarán yendo a energías menores que la inicial; pero si esta última era cero, la que estarán adquiriendo en el proceso, al acercarse, es una energía negativa. Por supuesto, este argumento puede hacerse más formal en relatividad general, definiendo apropiadamente la energía gravitatoria, pero la conclusión será la misma.

En un universo plano existe un equilibrio entre las energías positivas no gravitatorias y la aportada por la gravedad que generan estas. En concreto, es posible que se cancelen mutuamente permitiendo un universo que tenga una energía total nula. Este punto es crucial porque permite admitir que el universo pudo haber surgido de una fluctuación del vacío, una fluctuación que

creó la materia y los campos de interacción de tal forma que la gravedad producida por esos sistemas aportara justamente la energía negativa que cancelase la energía positiva de los distintos campos no gravitatorios.

Que el universo sea plano es, pues, una cuestión esencial para determinar cómo fue su origen y el papel que desempeñó el vacío en la fase originaria.

UNA ENERGÍA QUE DOMINA EL UNIVERSO

El origen y las características de la energía oscura es uno de los problemas relevantes que se plantea la física contemporánea. La idea de su existencia se remonta a 1917, cuando Einstein propuso el primer modelo teórico de la cosmología basándose en su teoría de la relatividad general. El caso es que Einstein se dio cuenta de que la relatividad general predecía un universo que evolucionaba con el tiempo, que se expandía o se contraía. Eso, inicialmente, chocó frontalmente con su idea de universo (pensaba que debía ser estacionario y eterno). Para evitar un universo en evolución introdujo en sus ecuaciones un nuevo término que dependía de una constante, la famosa *constante cosmológica*. Como el propio Einstein dedujo, esa constante no era más que el valor de la energía del vacío. Pero la energía del vacío tiene una curiosa propiedad: genera gravedad repulsiva. Dado que esa idea era novedosa, pues en la época no había constancia experimental de que el vacío pudiera tener energía, fijó a mano el valor de la constante justamente para que la repulsión debida a la constante cosmológica, o a la energía del vacío, compensara la atracción del resto de energías y el universo pudiera estar en un estado estacionario. Sin embargo, por un lado el universo se está expandiendo y por otro un universo como el que presentó Einstein es inestable; cualquier perturbación haría que se expandiera o se contrajera saliendo del estado estacionario. Ante estas evidencias, Einstein, como toda la comunidad de cosmólogos, dejó de lado la constante cosmológica y él mismo dijo que su introducción en las ecuaciones había sido un error.

No obstante, cuando en 1998 se estableció que el universo se está expandiendo aceleradamente el tema volvió a cambiar. Para que la expansión sea acelerada es necesario algún elemento que genere repulsión gravitatoria de forma que haga que el propio espacio se estire. Esto se consigue con la energía del vacío —es decir, la constante cosmológica de Einstein sí es necesaria—, y tiene dos propiedades importantes. La primera es que al introducir la energía del vacío en las ecuaciones de la relatividad general se aprecia que genera repulsión gravitatoria tal y como se necesita. Y la segunda es que la densidad de energía del vacío es constante a pesar de la expansión del universo. Cuando se originó este último apareció una determinada cantidad de materia ordinaria —partículas y radiación— y de materia oscura. Conforme el universo se expande la densidad de estas contribuciones decrece, ya que existe la misma cantidad total de materia ordinaria y materia oscura repartida en un volumen cada vez mayor. Sin embargo, con la densidad de energía del vacío ocurre que a medida que el universo se expande el vacío aumenta, y por tanto se incrementa su energía, pero de tal forma que ese aumento de energía dividido por el aumento de volumen es una cantidad constante.

En la actualidad se ha fijado la densidad de energía del vacío en $0,683 \rho_{\text{crit}}$, una cantidad muy pequeña y positiva. Por ello la energía del vacío solo muestra su presencia en la forma de repulsión gravitatoria en escalas cosmológicas; en escalas más pequeñas la atracción entre objetos celestes es mucho más intensa que la repulsión generada por el vacío y por eso es posible tener sistemas planetarios, galaxias, cúmulos de galaxias, etc.

Como se ha descrito, el vacío es el estado de mínima energía de los distintos campos. Siguiendo esa lógica los físicos calcularon cuál era la energía del vacío proporcionada por los vacíos de los campos del modelo estándar. El problema es que el resultado que se obtiene en este cálculo predice una densidad de energía del vacío mayor que la densidad crítica por más de cien órdenes de magnitud. Esta descomunal discrepancia entre teoría y experimento resulta un grave problema para la teoría cuántica de campos —el mejor marco que tenemos para des-

cribir la física de partículas— y se ha denominado la catástrofe del vacío, siendo considerada la peor predicción de la historia de la física.

Se desconoce por qué la energía del vacío es cercana a cero y positiva. Para poder responder a esta cuestión es preciso conocer si hay física más allá del modelo estándar, por ejemplo supersimetría, *supercuerdas*, *dimensiones extra* u otras cosas posibles pero que aún no se han podido refrendar experimentalmente. Además, el modelo estándar no tiene en cuenta la gravedad, así que parece necesaria una teoría cuántica de la gravedad para poder entender por qué la energía del vacío cosmológico tiene el valor que tiene.

A pesar de todo, sí es posible afirmar una cosa: la energía oscura está dominando actualmente la evolución de nuestro universo, cuya aceleración empezó al parecer hace cinco mil millones de años, más o menos cuando se estaba formando nuestro Sol. Eso es así porque en esa época la densidad de energía producida por la materia ordinaria y por la materia oscura cayeron por debajo de la densidad asociada a la energía oscura. La humanidad vive, por tanto, en una etapa en la que dichas densidades son comparables, es decir, tienen valores relativos cercanos, lo cual hace surgir el conocido *problema de la coincidencia cósmica*, que se plantea la pregunta de por qué vivimos en dicha época, donde las densidades de energía de las distintas componentes son comparables entre sí. Es cierto que la densidad de energía de la materia ordinaria es un 0,049 respecto a la densidad crítica, que la de la materia oscura es un 0,268 y que la de la energía oscura es un 0,683. Pero esos números son comparables entre sí, es decir, unos no son mucho mayores o menores que los otros.

EL ORIGEN DEL UNIVERSO Y LA INFLACIÓN COSMOLÓGICA

Abordemos ahora, en relación al origen del universo, la teoría que hoy por hoy más respaldo observacional tiene, aunque hay que aclarar que quedan muchos detalles por resolver que serán solucionados cuando la tecnología permita mejores observacio-

nes y un mejor entendimiento de la materia en su nivel más fundamental. La citada teoría se denomina *inflación cosmológica*.

La inflación cosmológica parte de la idea de que el universo pasó por un estado de vacío de un campo denominado *inflatón*. Este campo era el único que existía entonces —los campos usuales y sus partículas asociadas aparecerían más tarde—, y estaba distribuido por todo el espacio, que en principio podía tener extensión infinita. Al igual que el campo de Higgs, el inflatón tenía un perfil de energía con un máximo local cuando su configuración era nula, es decir, podía estar en un estado de falso vacío, un estado sin partículas asociadas al campo pero sin ser el estado de mínima energía. Cuando se introduce la gravedad en esta situación se aprecia que el inflatón, en su estado de falso vacío, generó una gran repulsión gravitatoria y eso produjo una gran expansión del espacio, la inflación.

El mecanismo de la inflación. El inflatón y su falso vacío

El inflatón sería un campo que presentaría un perfil de energía parecido al campo de Higgs, pero con algunas diferencias. El inflatón (figura 6) tendría acceso a un estado de falso vacío, es decir, estados en los que la energía no es la mínima posible y correspondiente a configuraciones nulas del campo. Sin embargo, este estado de falso vacío tendría un perfil de energía fundamentalmente plano antes de llegar a una suave caída hacia el verdadero vacío.

Inicialmente este campo se encontraría en este estado de falso vacío y tendería a ir a su estado de vacío real. Pero el inflatón en su estado de vacío y durante su caída al vacío real tendría gravedad repulsiva (figura 7), lo que daría lugar a una gran expansión del espacio donde se encontrase.

Al llegar al mínimo de energía, el campo empezaría a sufrir fluctuaciones, intentaría subir hacia arriba en su energía y comenzaría a disipar la que tenía inicialmente. Es decir, la energía que tenía en el falso vacío sería superior a la energía que tenía en el vacío real, por lo que tendría que liberarla. Lo maravilloso es que la cuántica dice que la liberación de la energía se efec-

FIG. 6

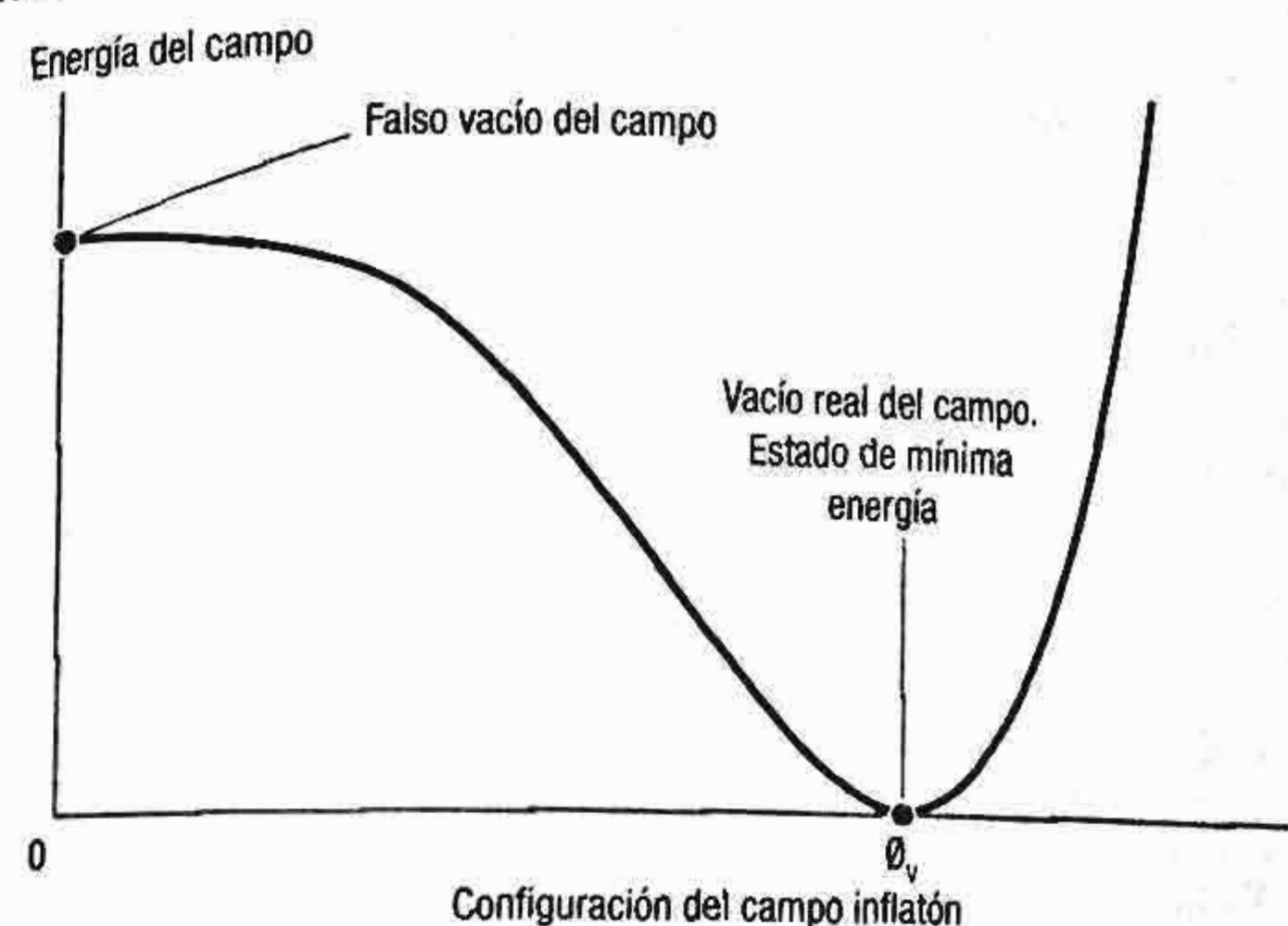
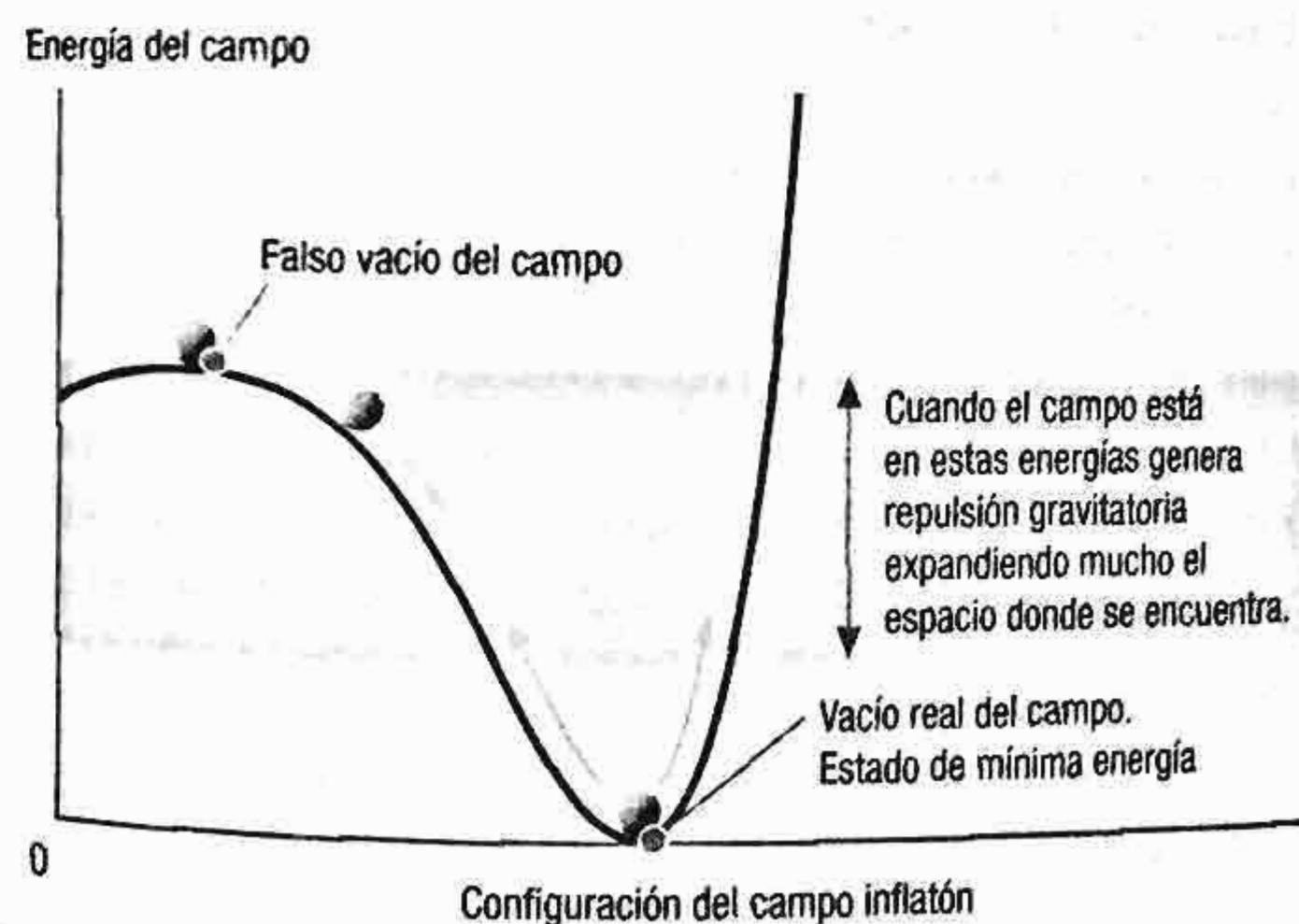


FIG. 7



túa creando campos y sus partículas asociadas, o sea, que los campos del universo que surgieron en su comienzo y que dieron lugar a los campos y partículas que se perciben hoy en día se originaron en el paso del falso vacío al vacío real (figura 8). Así, pues, según la inflación cosmológica, este sería el origen de

DENSIDAD MEDIA DEL UNIVERSO

Debido a la expansión del universo las densidades de energía relativas a las materias ordinaria y oscura disminuyen con el tiempo. El universo originó un número concreto de las partículas que conforman ambas materias, así que al expandirse su densidad disminuye. En cambio, la energía oscura tiene una densidad de energía constante, ya que cuando el espacio se expande, la energía oscura y el volumen aumentan proporcionalmente, resultando en que la densidad de la energía oscura se mantiene constante. Esto implica que en el origen del universo la densidad de materia era mucho mayor que la de la energía oscura. A medida que el universo se fue expandiendo, la densidad de materia fue disminuyendo hasta que fue superada por la de energía del vacío, algo que ocurrió hace unos cinco mil millones de años. Actualmente las densidades de energía de la materia aún son comparables a la de la energía oscura. En el futuro, esta última será la que domine y determinará el fin del universo, que seguirá acelerando, de forma que al final, en nuestro cielo, se verá un inmenso vacío oscuro y solo se detectará una única galaxia, la nuestra, no pudiéndose detectar la radiación cósmica de fondo.

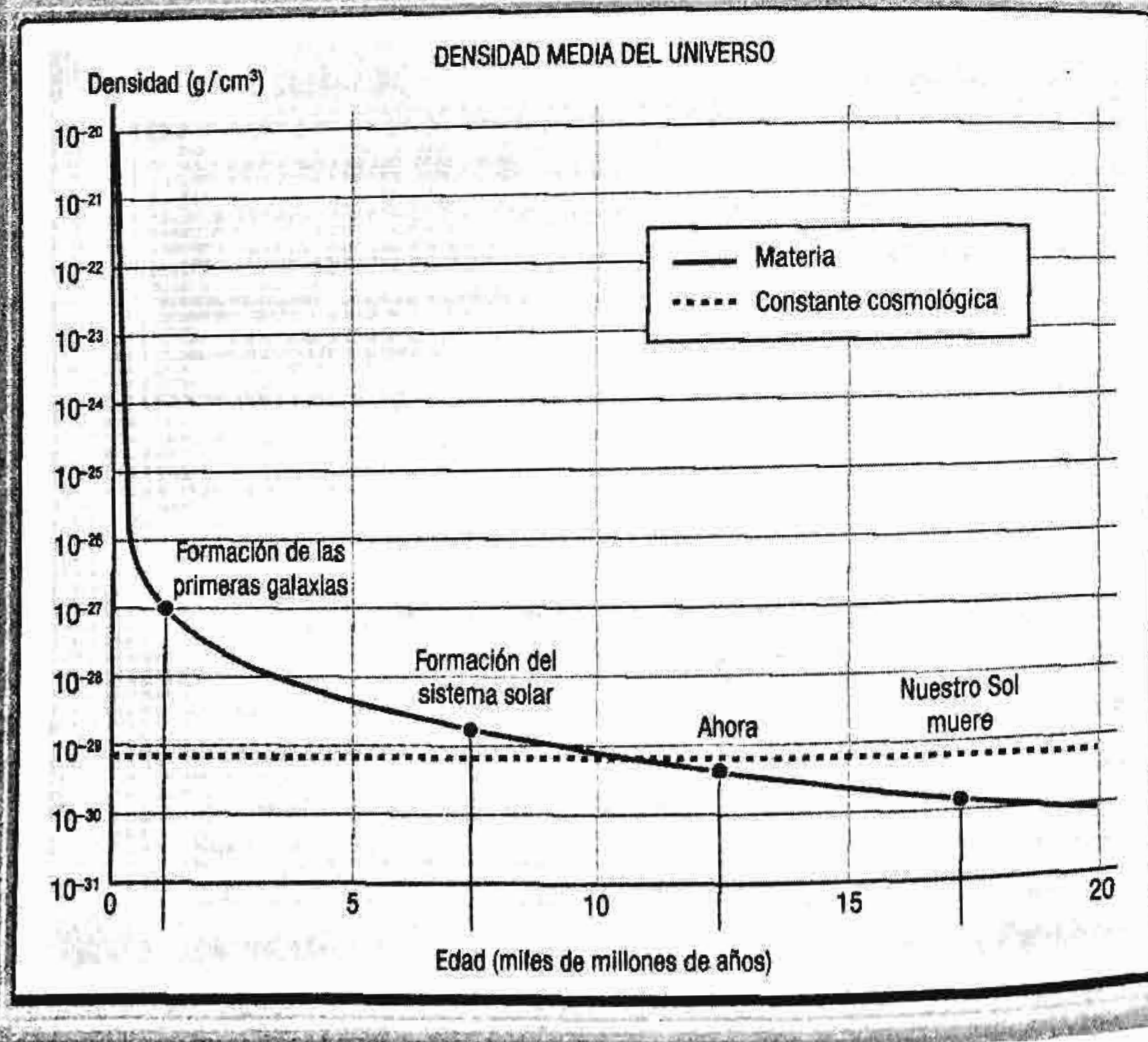
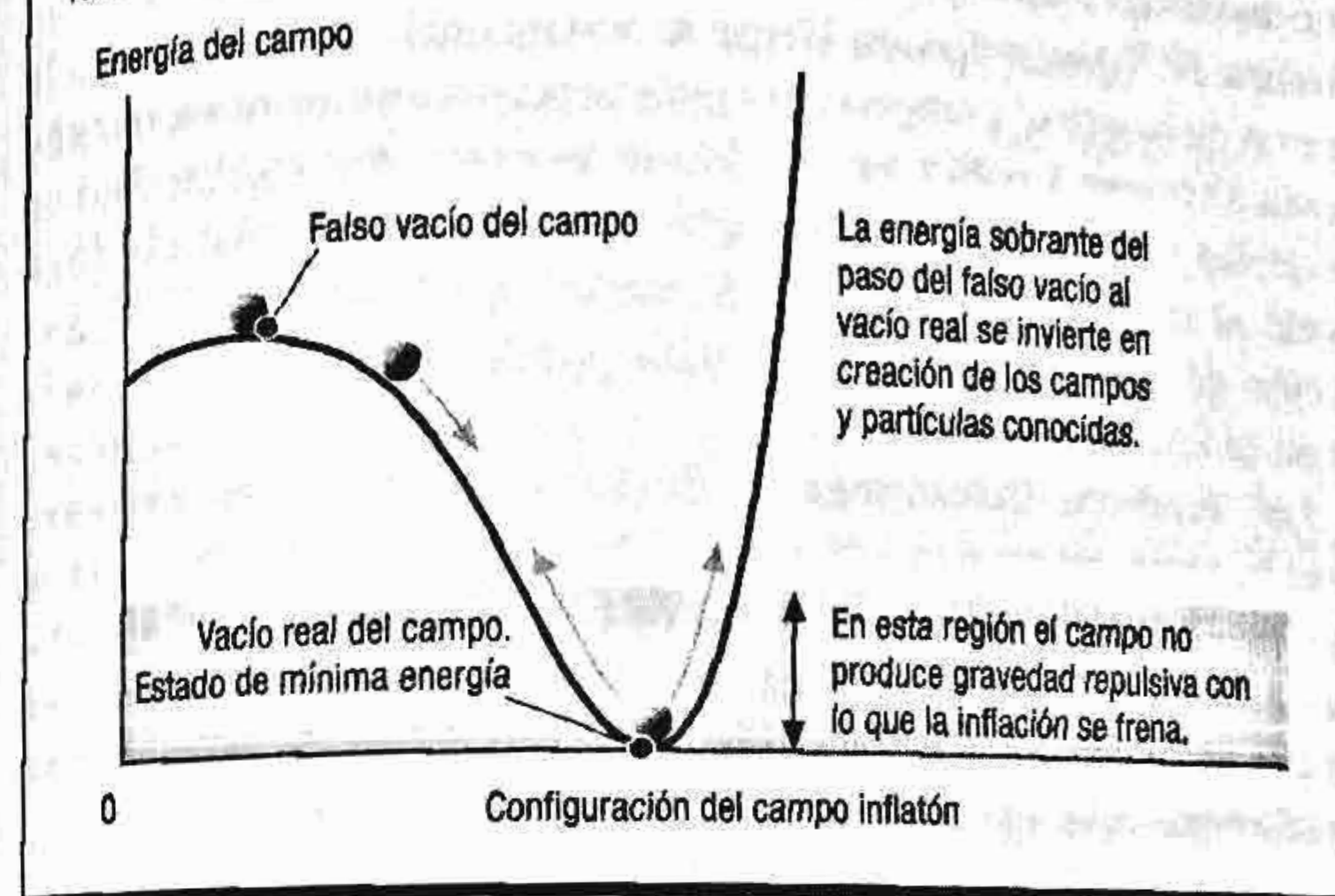


FIG. 8



nuestro universo. Al llegar al vacío real el ritmo de expansión se redujo al que necesita la cosmología estándar porque este vacío real ya no presentaba la propiedad de gravedad repulsiva.

En resumen, empezando con un campo inflatón en su estado de vacío, se produjo una tremenda expansión del espacio que lo contenía. Cuando evolucionó y llegó a su vacío real, la expansión inflacionaria se frenó a un ritmo estándar y se crearon en un *flash* los campos y las partículas como residuos de la energía sobrante del campo. Empezó por tanto la cosmología estándar.

No hubo un Big Bang, hubo un *Small Flash*

Se supone, pues, que antes de originarse nuestro universo, el espacio estaba relleno de un campo, el inflatón, en un estado de falso vacío que debido a fluctuaciones cuánticas propias salió de ese estado para dirigirse a su estado de mínima energía. Pero evidentemente esta transición de falso vacío a vacío real no se tuvo que producir en todo el espacio al mismo tiempo. En la imagen que se tiene en la actualidad bastaría que en una región del

espacio tan pequeña como 10^{-28} cm se produjera una fluctuación que sacara al inflatón de su estado de falso vacío y que tan solo tardara 10^{-38} segundos en llegar al vacío real. En ese tiempo la región en la que el campo sufre este proceso aumenta su tamaño hasta alcanzar 1 cm. Y es ahí donde se crean los campos en un pequeño *flash* a partir de la energía sobrante del paso del falso vacío al vacío real (figura 9). A partir de ese momento la evolución de esa región viene descrita por la teoría estándar de la cosmología.

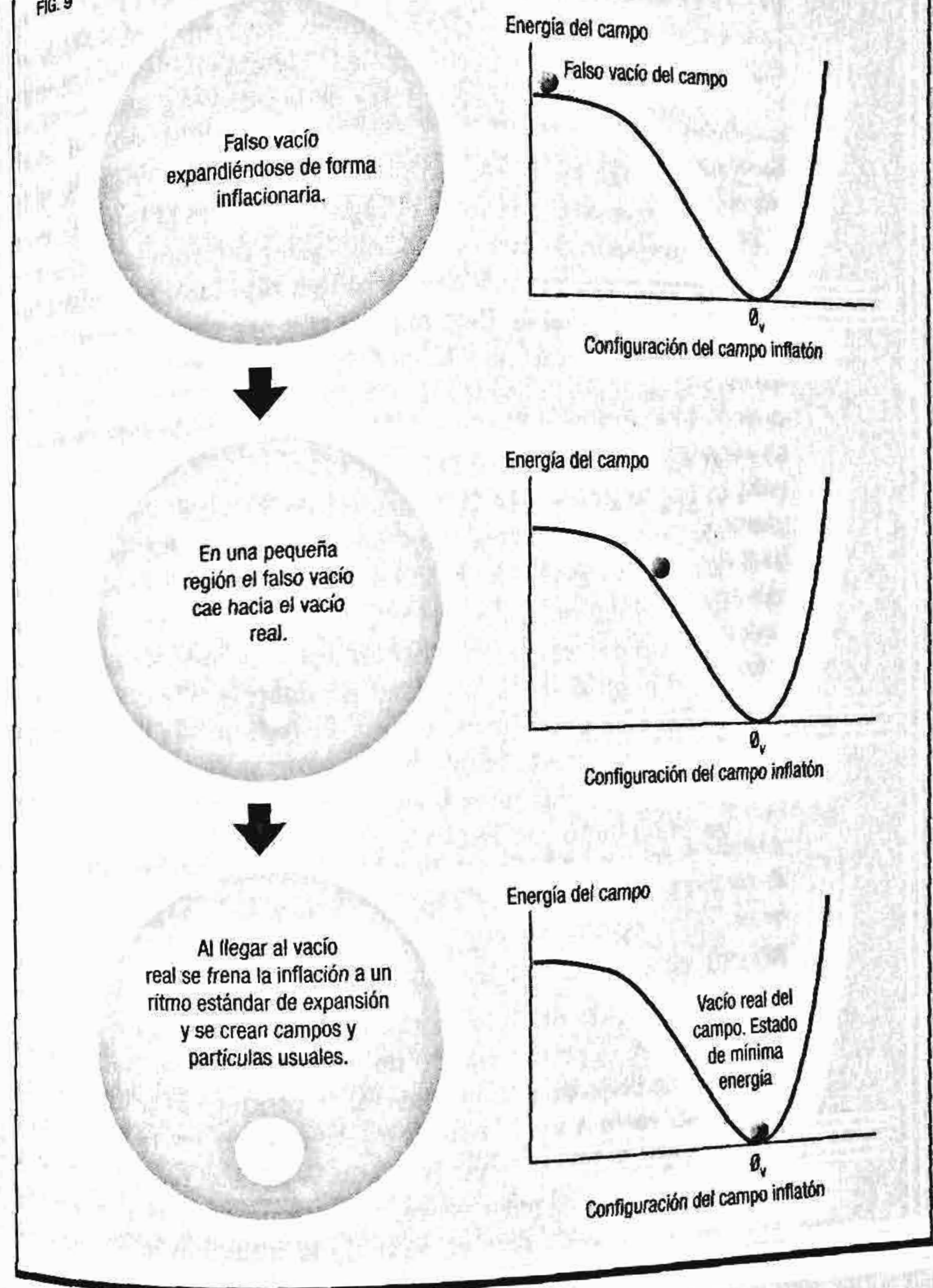
Los modelos inflacionarios sugieren que nuestro universo está inmerso en un espacio mayor que aún tiene al inflatón en el estado de falso vacío y por lo tanto con una expansión inflacionaria. Nuestro universo es una burbuja dentro de ese medio en la que se ha producido localmente la transición de falso vacío a vacío real.

Esto ha llevado a algunos físicos y cosmólogos a proponer que este proceso se puede dar en otros puntos del falso vacío, produciendo otros universos como el nuestro aunque, debido a diferencias en la salida de la inflación, estos pueden tener composiciones de campos y partículas diferentes, lo que lleva a la idea de *multiverso*. Por desgracia esta es una idea aún especulativa y difícil de comprobar empíricamente ya que estos universos creados dentro de un medio de falso vacío del inflatón se separan a un ritmo endiablado, debido a la potente expansión que se produce en el medio que los separa, y por lo tanto no es posible tener acceso experimental a ellos en caso de existir.

Soporte observacional a la inflación cosmológica

La teoría de la inflación es en realidad un conjunto de modelos que difieren unos de otros en los detalles del perfil de energías; eso influye sutilmente en las predicciones de cada modelo sobre magnitudes que se están intentando medir en la actualidad. Aquí se ha presentado el modelo más simple de todos, el cual parece ser uno de los favorecidos por las observaciones cosmológicas efectuadas hasta la fecha.

FIG. 9



Los modelos inflacionarios hacen unas cuantas predicciones genéricas sobre el universo al que darían lugar, con ligeras diferencias entre unos y otros que permiten discernir entre ellos en base a las mediciones experimentales. Algunas de las predicciones genéricas que se pueden extraer de la inflación son:

- El universo ha de ser isótropo y homogéneo. Debido a la gran expansión que sufre el espacio cuando el inflatón está en su estado de falso vacío, cualquier diferencia entre dos puntos o dos direcciones se diluye rápidamente hasta hacerse inapreciable. Esto explica que nuestro universo verifique que es isótropo y homogéneo tal y como se puede ver en la radiación cósmica de fondo.
- El factor de densidad Ω ha de valer 1. La inflación cosmológica requiere que la densidad de nuestro universo sea justamente la crítica para tener un universo plano. Las ecuaciones extraídas de los modelos inflacionarios obligan a que la diferencia en valor absoluto $|1 - \Omega|$ se anule en el proceso de expansión inflacionaria con independencia del valor original de la densidad de energía. Visto desde una forma más geométrica, lo que se obtiene es que da igual cómo de curvada empiece la región donde el falso vacío pasa a vacío real, pues al expandirse de forma inflacionaria se estira tanto que llega a la planitud.
- El inflatón está sujeto a fluctuaciones cuánticas como cualquier otro campo, y estas fluctuaciones aparecen y desaparecen en tiempos muy breves. Estas fluctuaciones se dan en su estado de falso vacío, durante la bajada a su vacío real y en el propio estado de mínima energía. Así, cuando en una pequeña región espacial se produce la transición de falso vacío a vacío real el inflatón sufre estas fluctuaciones que le hacen tener en algunos puntos mayor o menor energía que los adyacentes. De este modo, hay puntos que tardan un poco más en salir de la inflación al llegar más tarde al vacío verdadero y otros que llegan antes. En otras

palabras, cuando finaliza la inflación existen pequeñas diferencias de densidad de energía en el espacio que ahora se expande a un ritmo estándar. Estas diferencias evolucionan con el tiempo y son heredadas por la radiación emitida al formarse los átomos neutros, o sea, son heredadas por la radiación cósmica de fondo. Así que las pequeñas diferencias de temperatura que se ven en la radiación de microondas del universo se generaron en el vacío que dio lugar a este. Y estas fluctuaciones son las que explican la formación de su estructura a gran escala.

La inflación, por tanto, explica la estructura de la radiación cósmica de fondo, explica la planitud del universo, la homogeneidad y la isotropía. Pero además de eso, la inflación predice en la mayoría de los modelos la generación de *ondas gravitatorias* en el mismo momento de aparición de nuestro universo, en el paso del falso vacío del inflatón a su vacío real. Durante el proceso, el propio espacio vibró generando ondas en sí mismo. Esto tuvo influencia también en la radiación cósmica de fondo pero aún no se ha conseguido detectar sus efectos debido a que son muy débiles y difíciles de medir. En la actualidad hay varias misiones científicas escudriñando la radiación cósmica de fondo buscando las huellas de estas ondas gravitatorias generadas por la inflación en el origen de nuestro universo. Hallar este efecto será un gran avance en nuestro entendimiento del origen del cosmos.

Lo que se ha contado hasta aquí no es una historia definitiva. Queda mucho por responder respecto al origen del universo. Si los modelos inflacionarios son la respuesta debería poder determinarse la forma precisa del perfil de energía del inflatón. Por supuesto, resta por determinar también qué es el inflatón, sus propiedades y su comportamiento físico, para todo lo cual habrá que mejorar las observaciones cosmológicas y las teorías y experimentos sobre los campos fundamentales.

La idea esencial que ha introducido la inflación es que en el origen había un campo, el inflatón, en un estado de falso vacío. Las propiedades de nuestro universo parecen favorecer esta imagen pero queda por saber el origen de este campo. Hay pro-

puestas que explican la aparición de todo el universo desde el vacío total (sin espacio, sin tiempo, sin campos), pero aún resta un ingrediente esencial para entender si este proceso es físicamente aceptable, una teoría cuántica de la gravitación coherente y predictiva, cosa que a día de hoy no existe en forma final aunque existen propuestas al respecto, como la *teoría de cuerdas* o la *gravidad cuántica de lazos*. Todo parece indicar que el universo es un gran préstamo del vacío: solo queda saber en qué términos se ha establecido este préstamo.

¿Vacío? Depende de a quién le preguntes

El vacío cuántico, como cualquier otro estado físico, tiene en algunas situaciones la capacidad de variar en función de quién lo esté definiendo. Bajo determinadas circunstancias, lo que para un observador parece encontrarse en el vacío cuántico, para otro distinto estará lleno de partículas.

El vacío cuántico, aparte de distar mucho de la concepción común de espacio vacío —debido a los campos que permean todo el espacio y a las constantes fluctuaciones de estos— es también un concepto relativo. Un mismo sistema físico, en su estado de mínima energía, se verá de distintas formas según el estado en que se encuentre el observador. Por ejemplo, en un sistema sin partículas, un observador que esté acelerando respecto a este sistema verá un continuo flujo de partículas que emergen del vacío.

Generalmente, esta generación de partículas desde el vacío involucra la presencia de un *horizonte*: un límite en el espacio-tiempo a partir del cual un observador no puede acceder o no se puede comunicar. El fenómeno más conocido asociado a los horizontes y a la aparición de partículas desde el vacío es la llamada *radiación Hawking*, que conduce a la evaporación de los agujeros negros. Otro ejemplo es el de un observador que tiene una aceleración constante, al cual le aparecerá una región del espacio-tiempo con la que nunca se podrá comunicar, y una radiación asociada que se denomina *radiación Unruh*, que es la radiación térmica que detecta, en el vacío, un observador acelerado. Igualmente, en un universo en expansión acelerada, existe

un horizonte y un flujo de partículas a través de dicho horizonte, la *radiación de Gibbons-Hawking*, así como una creación de partículas del vacío, como fue descrita en los años sesenta por el físico neoyorquino Leonard Parker (1938).

Aunque estos fenómenos se dan en distintos contextos, todos presentan unas características que comparten. Entender estas características es esencial para una comprensión más completa del vacío cuántico y de la propia definición de partícula. El vacío, pues, no solo tiene entidad propia y es capaz de interactuar con otros estados y sistemas físicos, sino que además, en algunas circunstancias, depende del observador que lo defina.

RELATIVIDAD ESPECIAL Y OBSERVADORES INERCIALES: UN VACÍO PARA TODOS

Como ya se ha expuesto, la teoría de la relatividad introduce una cantidad invariante para todo observador inercial: la velocidad de la luz en el vacío. La velocidad de la luz es la velocidad límite del universo, y ningún sistema físico con masa puede alcanzarla, pues para ello sería necesaria una cantidad infinita de energía. Además, conceptos como *longitud* o *intervalo temporal* dependen del observador inercial (no acelerado) que los defina, son conceptos relativos.

Cuando se combinan mecánica cuántica y relatividad especial para dar lugar a la *teoría cuántica de campos*, surge un punto interesante: en todo campo es posible definir su estado de vacío, es decir, el estado de mínima energía, que usualmente coincide con el estado en el que no hay presentes partículas asociadas al campo. Además, la teoría cuántica de campos afirma que el estado de vacío es el mismo para cualquier observador inercial. Así, en el caso de un conjunto de observadores inerciales moviéndose en distintas direcciones con diferentes velocidades unos respecto a otros, si uno de ellos determinase que en una región concreta existe un vacío cuántico, todos los demás coincidirían con él. Efectivamente, el vacío cuántico es un invariante relativista, como la velocidad de la luz en el vacío.

OBSERVADORES CON UNA ACELERACIÓN UNIFORME Y EL VACÍO

Supongamos ahora la presencia de un observador inercial que determina que se encuentra en una región donde existe un vacío cuántico. Como se ha dicho, cualquier otro observador inercial determinará exactamente lo mismo, ya que el vacío cuántico es el mismo para todos ellos. Pero si se introdujese en la situación a un observador que estuviese acelerando de manera uniforme y continua, atendiendo a la relatividad especial, existiría un límite de velocidades al que este observador acelerado no podría llegar: la velocidad de la luz. Por más tiempo que acelerase nunca podría llegar a alcanzarla.

Diagramas de espacio-tiempo

El espacio-tiempo tiene cuatro dimensiones —tres espaciales y el tiempo—. Desafortunadamente, no es posible realizar representaciones en cuatro dimensiones, pero sí extraer mucha información a partir de diagramas con una dimensión espacial y el tiempo. Así, en el eje vertical se coloca el tiempo que ha transcurrido para una partícula (en realidad ct , con lo que se consigue que la cantidad tenga dimensiones de longitud) y en el eje horizontal la coordenada X , la posición de la partícula. Una línea en este diagrama indica el movimiento de esta partícula a lo largo del tiempo. En particular, un rayo de luz moviéndose hacia la izquierda o hacia la derecha (X negativas o positivas), y que en el momento cero se encuentre en la posición cero, tendrá una velocidad constante c y su trayectoria corresponderá a una línea recta 45° por encima de la parte negativa o positiva del eje X . Estas dos rectas conforman una estructura denominada *cono de luz*. Cualquier partícula con masa que se mueva tendrá una velocidad menor que la velocidad de la luz en el vacío y su trayectoria estará contenida en el interior del cono.

Si se desea describir el movimiento de un observador uniformemente acelerado que comienza su movimiento a una distancia c^2/a del origen, donde a es la aceleración, se descubrirá que

la trayectoria que sigue es una curva que se aproxima al cono de luz, pero que no consigue tocarlo, es decir, no es posible alcanzar la velocidad de la luz. Visto de otra manera, si un rayo de luz es emitido desde el origen en la misma dirección en que se mueve el observador y al mismo tiempo que este empieza a moverse, cada vez se acercará más a él pero nunca llegará a atraparlo. Los rayos de luz que se emitan después o desde una distancia más lejana, es decir más allá del cono de luz, tampoco llegarán a contactar nunca con el observador.

Para este observador el cono de luz se comporta como un horizonte, como cuando caminamos sobre la superficie de la Tierra y este es inalcanzable por rápido que nos movamos. El observador acelerado tiene una región del espacio-tiempo prohibida a la que no puede acceder y con la que no se puede comunicar porque ello implicaría moverse más rápido que la luz. El cono de luz se presenta pues como una barrera infranqueable, un horizonte de pleno derecho.

Esta situación introduce una asimetría entre observadores, puesto que los uniformemente acelerados ven un horizonte, una región inaccesible del espacio-tiempo. Esto tiene consecuencias respecto al vacío cuántico, la definición del cual depende de las coordenadas del espacio-tiempo. Si un observador inercial identifica un vacío cuántico en una región del espacio-tiempo no verá partícula alguna. Pero si se le pregunta al observador acelerado, este dirá que dicho estado está lleno de partículas; detectará un flujo de partículas procedente del horizonte y dicho flujo tendrá una determinada temperatura que será proporcional a la aceleración del observador. A este efecto, definido en 1976, se le denomina *efecto Unruh*, pues fue descrito, entre otros, por el físico canadiense William George Unruh (1945).

La temperatura que mediría un observador con una aceleración de 10^{20} m/s² alcanzaría el valor de 1 K, un grado por encima del cero absoluto. Sin duda, se trata de una temperatura muy pequeña para su detección, y una aceleración muy grande para poder conseguirse y mantenerse durante mucho tiempo en experimentos. Si bien hay varios de ellos que afirman haber conseguido medir este efecto, aún no está claro si las mediciones son

acertadas o no. Sin embargo, hay pocas dudas sobre la veracidad del efecto Unruh, ya que su existencia es necesaria para la consistencia interna de la teoría cuántica de campos.

El efecto Unruh pone de manifiesto que el concepto de vacío no es absoluto, sino que lo que un observador ve como vacío cuántico, otro lo puede describir como lleno de partículas a una determinada temperatura.

HORIZONTES

Hemos descrito la existencia de un horizonte para un observador que sufre una aceleración constante en el contexto de la relatividad especial, y hemos visto que esto juega un papel determinante en la definición de vacío. Pero este no es el único horizonte que se puede definir en física —y el efecto Unruh no es el único en el que las partículas y el vacío cuántico se vuelven un concepto relativo—.

Se puede definir un horizonte como la superficie abstracta que delimita una región del espacio-tiempo que es inaccesible para un determinado conjunto de observadores. Dicho con otras palabras, un horizonte es el límite entre dos regiones del espacio que no se pueden comunicar entre sí. Evidentemente, un horizonte no es una barrera física tangible, sino una superficie que queda definida por el espacio-tiempo que se esté estudiando y por los observadores que se definan en dicho espacio.

El primer tipo de horizonte, ya conocido, es aquel que aparece para un observador acelerado en el espacio-tiempo de la relatividad especial. Debido a que hay un límite para la velocidad que puede adquirir este observador —la velocidad de la luz en el vacío—, hay regiones del espacio a las que no puede acceder. Esta característica se presenta como una superficie matemática que delimita tal región, el horizonte.

Los agujeros negros son otro contexto en el que aparecen horizontes. Un agujero negro se define usualmente como aquel cuerpo que ha comprimido tanto su masa, reduciendo su tamaño, que en sus inmediaciones la gravedad es tan potente que ni

REPRESENTACIÓN DEL ESPACIO-TIEMPO

En un diagrama de espacio-tiempo las partículas que se mueven a la velocidad de la luz vienen representadas por líneas inclinadas 45° respecto a los ejes de tiempo y espacio, conformándose así el cono de luz para un observador estacionario situado en el origen de coordenadas del diagrama. Este cono de luz ha de entenderse en realidad en cuatro dimensiones (tres para el espacio y una para el tiempo), pero los argumentos funcionan también con diagramas que solo emplean dos de ellas, una temporal y otra espacial. La trayectoria de una partícula con masa siempre estará contenida dentro del cono, y la curva que describe nunca tendrá una pendiente que sobrepase los 45° , ya que eso significaría superar la velocidad de la luz (figura 1). Estas curvas se denominan *líneas de mundo*, así como también *líneas de universo*, y son una forma gráfica y visualmente comprensible de representar la evolución de la partícula en el espacio-tiempo.

Penetrando en el cono de luz

Si se describe un observador estacionario en un punto del eje X (figura 2), la línea de mundo asociada será una recta vertical, ya que permanecerá en la misma posición pero en distintos instantes temporales. Así que tras un intervalo de tiempo, su línea de mundo entrará indefectiblemente en el cono de luz del observador que lo define.

Aproximación sin cruce

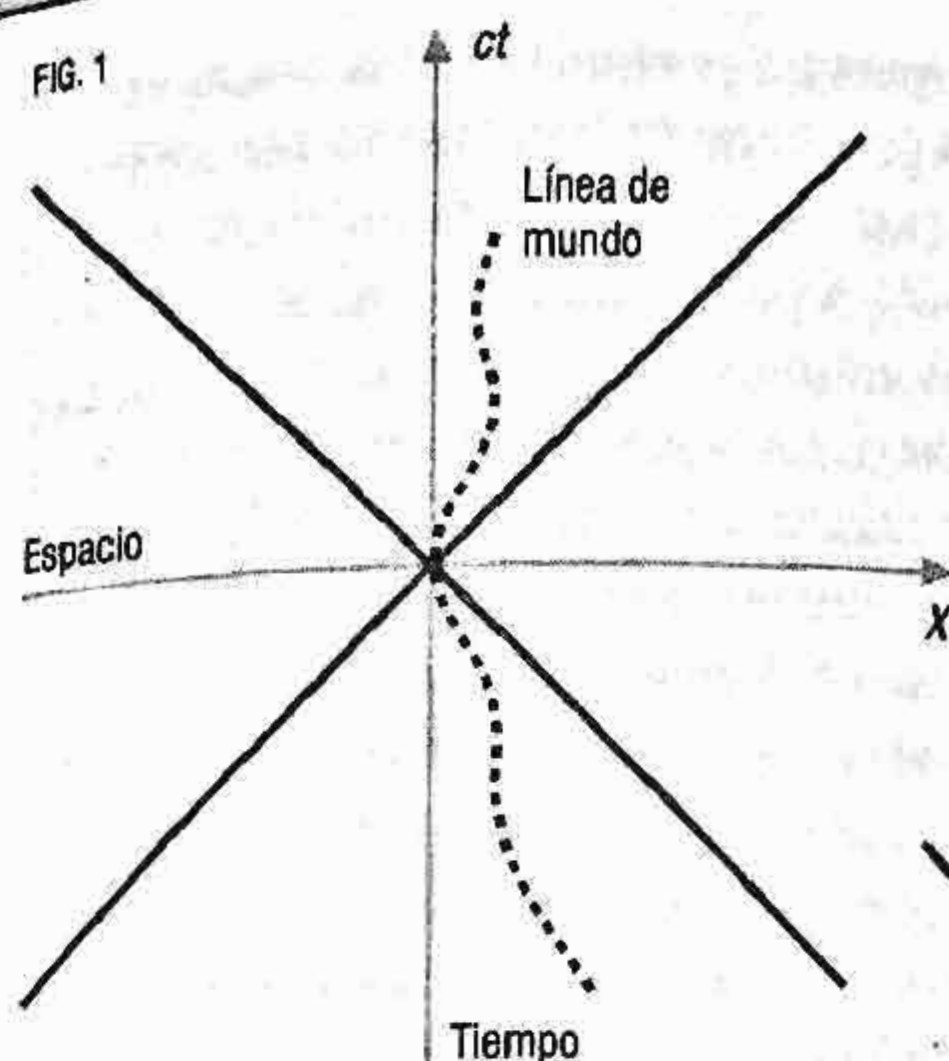
En cambio, para un observador que se moviese con una aceleración constante a en el eje X , y que en el instante cero tuviese velocidad nula y se encontrase a una distancia c^2/a del origen, la curva que este presentaría en el diagrama (figura 3) se acercaría a la superficie del cono de luz —la línea que lo representa en el diagrama bidimensional—, pero sin llegar a tocarla nunca.

Horizonte

En esta situación se aprecia un hecho interesante. Tomando cualquier punto más allá de la superficie del cono definido por el observador inercial, indicada en la misma figura 3, es posible comprobar que ninguna señal que parta desde esos puntos puede llegar al observador acelerado. Para probar eso basta con tomar cualquier punto de esa zona y trazar líneas a 45° , que serían rayos de luz enviados desde dichos puntos. Ninguno se encontrará jamás con el observador acelerado. Por lo tanto, existe una región de la cual dicho observador no puede obtener ninguna información y la superficie del cono que la delimita es un horizonte.

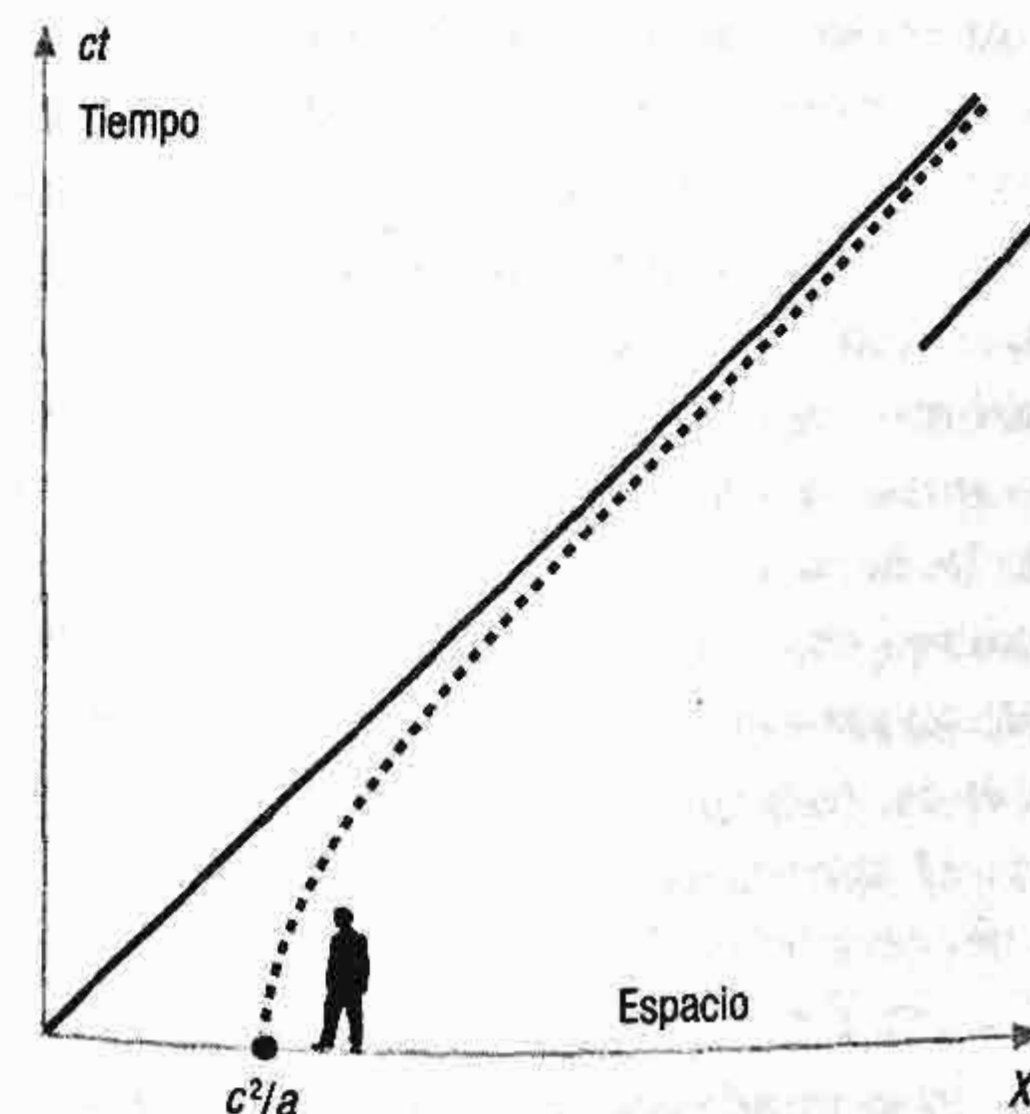
Territorio prohibido

La aparición de este horizonte a causa de la aceleración de un observador modifica su percepción del espacio-tiempo donde habita, introduciendo regiones a las que no puede tener acceso. Aparte de este hecho, la presencia del horizonte supone cambios en su forma de describir los campos cuánticos y hará que un observador inercial y un observador acelerado no coincidan en la identificación del vacío de dichos campos.



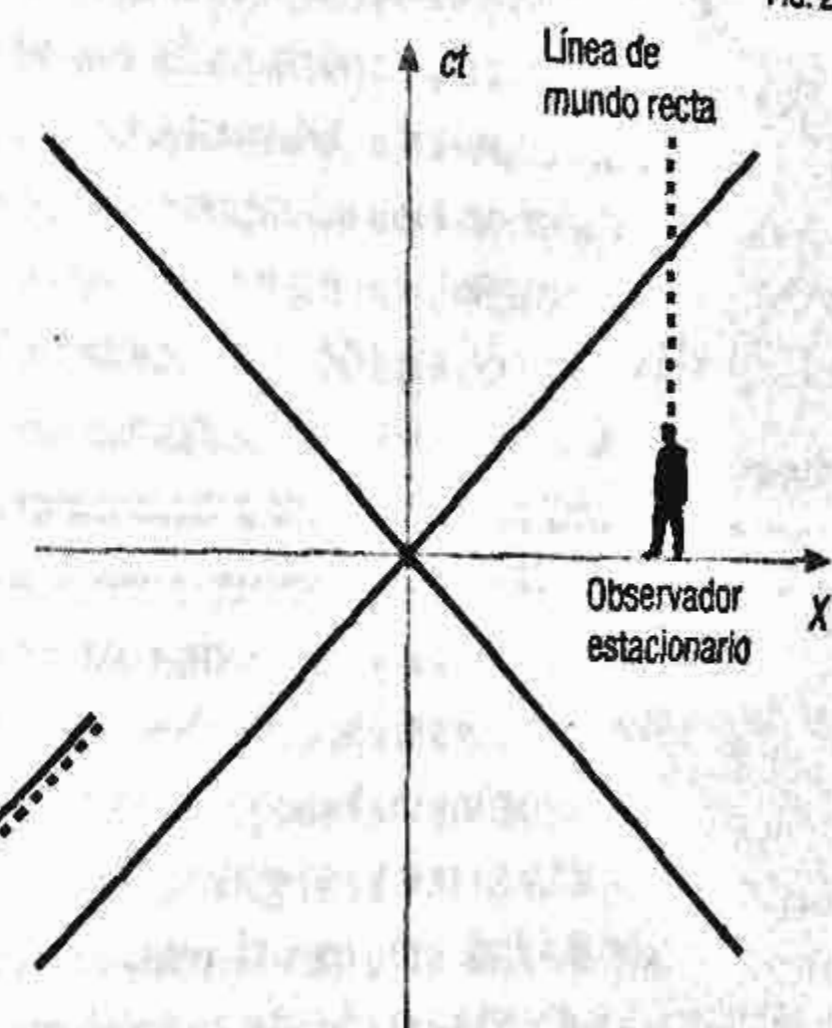
En la figura 1 se representa la línea de mundo de una partícula con masa, cuya curva o trayectoria en ningún momento sobrepasará la pendiente de 45° del cono de luz; de lo contrario superaría la velocidad de la luz en el vacío, algo que no es físicamente posible.

FIG. 3



En la figura 2 se muestra la línea de mundo de un observador estacionario, la cual acabará penetrando en el cono de luz de este último. En cambio, en la figura 3, la línea de mundo de un observador en aceleración constante jamás llegará a tocar la superficie del cono de luz.

FIG. 2



la luz puede escapar de él. Pero también puede definirse de otra forma: un agujero negro es una región del espacio en la que un observador que esté en el interior (idealmente) no se puede comunicar con otro exterior porque para ello tendría que mandar señales a mayor velocidad que la de la luz. Por lo tanto, para el observador interior el agujero negro viene delimitado por una superficie que marca el límite a partir del cual, si es traspasado, se pierde la capacidad de comunicación con el exterior del agujero. Esta superficie es su horizonte y, en el caso de agujeros sin carga eléctrica ni rotación, dependerá solamente de su masa, de manera que, a mayor masa, mayor tamaño del horizonte.

Evidentemente, si alguien se dejase caer hacia el agujero, al menos en la teoría clásica, atravesaría sin problemas la posición del horizonte. Durante la caída podría ir mandando datos de su viaje a un compañero exterior, pero no podría informarle acerca del camino en su totalidad. Una vez que se cruza el horizonte ya no hay comunicación posible con el exterior.

Un universo en expansión acelerada como el nuestro es otra situación en la que aparecen horizontes. En tal caso, habrá objetos de los que nunca se tendrá conocimiento porque la luz que han emitido no podrá alcanzarnos, debido a que la distancia que nos separa de ellos aumenta mucho más rápido de lo que la luz propagándose puede cubrir. Por lo tanto, existe un horizonte, un límite entre regiones del universo con las que no es posible ni recibir ni enviar información de ningún tipo.

La existencia de horizontes permea la física en muchos campos y está íntimamente relacionada con el concepto del vacío, ya que este depende de la descripción del espacio-tiempo. Así que es bueno insistir una vez más en que dichos horizontes son superficies que delimitan regiones del espacio que no pueden comunicarse; ni más, ni menos.

GENERACIÓN DE PARTÍCULAS Y AGUJEROS NEGROS

Siguiendo las ideas que desembocan en el efecto Unruh, es posible aplicar el mismo razonamiento a los agujeros negros y

a nuestro universo, ya que ambos sistemas tienen horizontes definidos. En concreto, en el caso de los agujeros negros, el hecho de que para unos observadores el vacío resulte estar lleno de partículas, mientras que otros no ven partícula alguna, se debe a la curvatura del espacio-tiempo y al horizonte que esta crea. Lo que queda por dilucidar son los detalles de este proceso y su viabilidad física.

El horizonte de un agujero negro y los distintos observadores

En un sistema donde se tiene una región en la que se concentra energía y se genera gravedad aparecerán de manera natural dos tipos de observadores. Por un lado estarán los estacionarios, que son aquellos que se mantienen a una determinada distancia del centro gravitatorio. Por otro se encontrarán los observadores en caída libre, que son aquellos que se dejan caer en el campo gravitatorio presente en la región donde habitan. Desde el punto de vista de la relatividad general, los observadores en caída libre están siguiendo los caminos dictados por la geometría, que se ve curvada por la presencia de la materia y la energía, y son los observadores más naturales para los problemas gravitatorios. Los observadores estacionarios, en cambio, han de estar sometidos a una fuerza que compense la atracción gravitatoria, es decir, la tendencia a seguir los caminos naturales en el espacio curvado en el que están inmersos.

Si el cuerpo gravitatorio resulta ser un agujero negro, formado por algún mecanismo como el colapso de una estrella muy masiva, es decir, durante el episodio de muerte estelar que los astrónomos denominan supernova, aparece un horizonte que delimita la región del espacio que no puede comunicarse con el exterior. Traspasado el horizonte, la gravedad es tan intensa que hasta la luz está condenada a no escapar de su interior, y, de hecho, nada puede escapar de él.

Ante ello, es necesario averiguar si el vacío cuántico está definido de igual forma para los dos tipos de observadores, tanto el estacionario como el de caída libre.

LOS OBSERVADORES EN UN AGUJERO NEGRO

Un agujero negro se identifica por la presencia de un horizonte, una superficie abstracta que marca el límite a partir del cual un observador interior no puede comunicarse con otro exterior. Así, un observador imaginario situado justo detrás del horizonte que intentase enviar un rayo de luz hacia el exterior, lo vería curvarse hacia el interior del agujero (figura 1).

Tipos de observadores

Cuando tenemos un objeto que genera gravedad, en especial un agujero negro, pueden definirse de forma natural dos tipos de observadores (figura 2). Por un lado se encuentran los observadores estacionarios, que se mantienen a una distancia fija del centro gravitatorio y por tanto están acelerando continuamente en contra de la atracción gravitatoria. Por otro, se hallan los observadores en caída libre, que son aquellos que se dejan caer hacia el objeto gravitatorio sin oponer resistencia.

Observadores análogos

Desde el punto de vista de la relatividad general los observadores en caída libre son los más naturales, ya que ellos son los que siguen los caminos que la geometría curvada del espacio, la gravedad, dispone como privilegiados. Estos observadores describen en cada momento de su caída, en un pequeño entorno a su alrededor, donde la curvatura del espacio-tiempo es despreciable, la física tal y como la dicta la relatividad especial. Así, en un sentido muy sutil, los observadores en caída libre son análogos en relatividad general a los observadores inerciales de la relatividad especial. Por su parte, los observadores estacionarios son análogos naturales de los observadores uniformemente acelerados descritos en el contexto de la relatividad especial, ya que en ambos casos los observadores deben estar sometidos a una fuerza constante. De hecho, uno de los conceptos fundamentales de la relatividad general, el *principio de equivalencia*, dice que ambos observadores, el que está sometido a una fuerza gravitatoria y el que está acelerado uniformemente, son incapaces de distinguir en cual de las dos situaciones se encuentran.

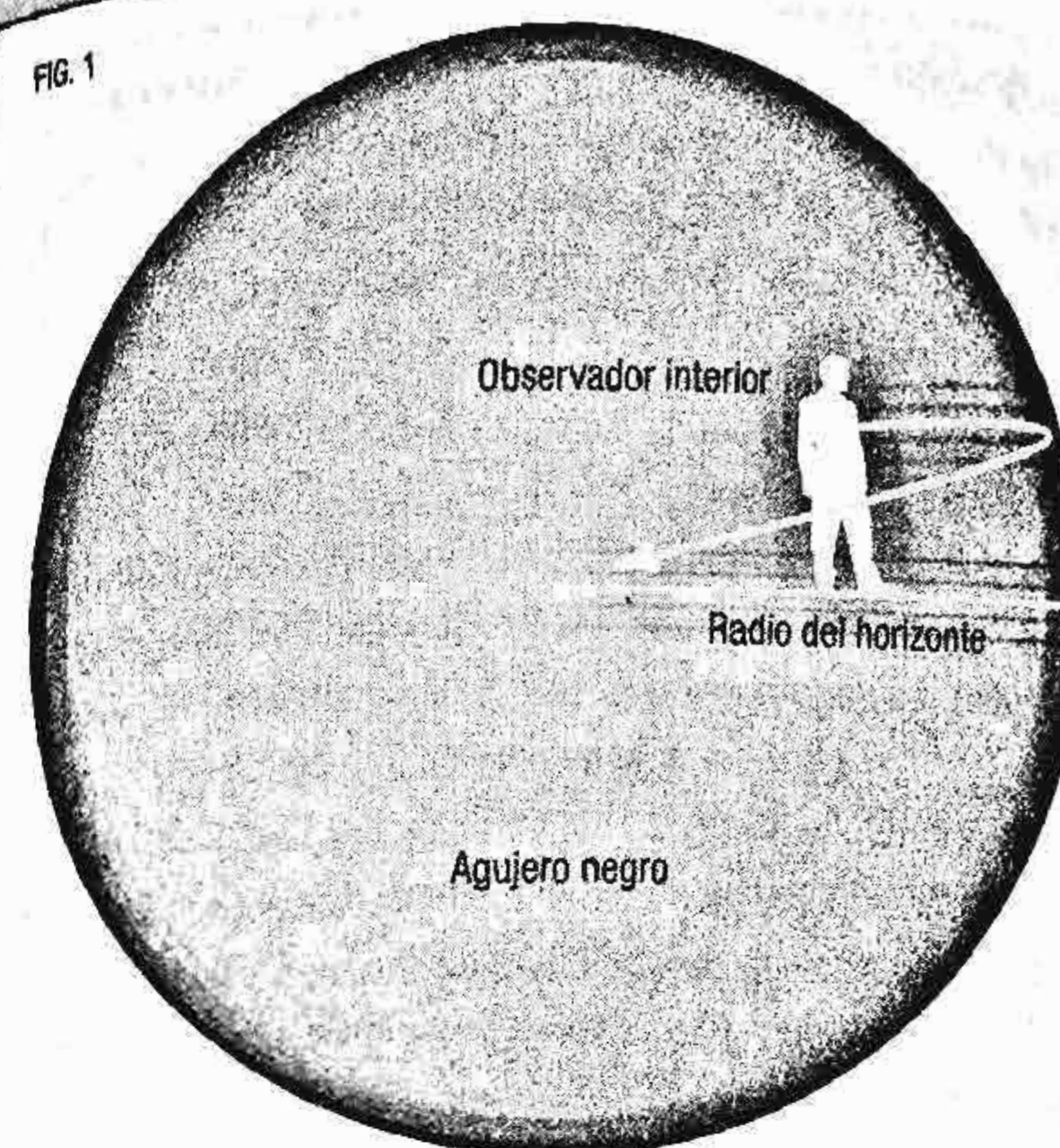
Comunicación interrumpida

En la situación planteada (figura 2) el observador en caída libre no percibirá nada cuando cruce el horizonte, al menos en el contexto de la relatividad general; simplemente seguirá su camino hacia el interior del agujero. Es cierto que las fuerzas gravitatorias en dicho interior crecen de forma muy rápida y que destrozarán cualquier cosa que caiga en él. Sin embargo, desde el momento en que el observador en caída libre llegue al horizonte y lo traspase, a este le será imposible enviar señal alguna al observador estacionario del exterior.

Definición dual

Es importante notar que se ha definido el agujero no a través de su proceso de formación, por colapso gravitatorio, sino por ser una región desconectada del exterior. Esta es la característica definitoria de un agujero negro independientemente de su mecanismo de formación. Por supuesto, ambas definiciones son consistentes porque un proceso de colapso gravitatorio produce un horizonte que aísla el interior del exterior, impidiendo que salgan señales del mismo.

FIG. 1



Un hipotético observador situado en las cercanías de un agujero negro y por detrás de su horizonte, si intentase lanzar un rayo de luz hacia el exterior vería a este curvarse y caer de nuevo hacia el interior.

FIG. 2



Observador estacionario, acelerando en contra de la atracción gravitatoria del agujero.

Un observador en caída libre que cruzase el horizonte y consiguiese sobrevivir no percibiría nada, pero dejaría de poder transmitir cualquier tipo de información al exterior, hacia el observador estacionario, quien lo vería desaparecer.



Observador en caída libre hacia el agujero.

Horizonte

Los agujeros negros se evaporan. La radiación de Hawking

En 1975, Stephen Hawking quiso estudiar el comportamiento de la teoría cuántica de campos en un espacio-tiempo que contuviera un agujero negro. La conclusión fue que los agujeros negros se evaporan, emitiendo partículas en el proceso. Hay muchas explicaciones a nivel divulgativo de este fenómeno, pero pocas ponen de manifiesto que su origen está, al igual que el efecto Unruh, en la comparación entre vacíos por parte de dos observadores distintos.

La situación es la siguiente: si se pide al observador en caída libre que describa el estado cuántico de los campos que puede observar, dirá que dicho estado es el de vacío cuántico, que denotaremos por $|0_{\text{caída libre}}\rangle$. Si ese mismo estado es presentado al observador estacionario, este, debido a que su descripción del espacio-tiempo será diferente, dirá que lo ve lleno de partículas (figura 1). De hecho, cuando muestre los cálculos para determinar el estado que él asigne, lo que se verá es que hay un flujo de partículas con energía positiva que lo alcanza, saliendo desde las inmediaciones del horizonte, así como un flujo de partículas con energía negativa entrando en este último (figura 2). El flujo de partículas que aparentemente sale del interior del agujero negro, y que cualquier observador exterior y estacionario observaría, se llama *radiación de Hawking*.

Deben aclararse sin embargo ciertos detalles. La existencia de estos flujos de partículas, uno saliente de energía positiva y otro entrante de energía negativa, es el resultado estricto de aplicar las reglas de la teoría cuántica de campos en presencia de un horizonte de agujero negro. El observador estacionario estará recibiendo un flujo de partículas con una temperatura que es inversamente proporcional a la masa del agujero, es decir, a mayor masa del agujero negro, menor emisión de partículas y con menor energía y por lo tanto con menor temperatura medida por el observador en cuestión. El agujero negro, por su parte, estará recibiendo un flujo de energía negativa, lo que hará que su energía, o sea, su masa, disminuya en el proceso, propiciando que a este fenómeno se le llame *evaporación de agujeros negros*.

FIG. 1



El observador estacionario ve el estado $|0_{\text{caída libre}}\rangle$ lleno de partículas.



El observador en caída libre ve a su alrededor un vacío cuántico $|0_{\text{caída libre}}\rangle$.

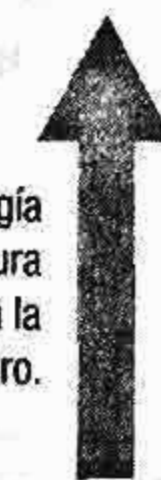
Horizonte

FIG. 2



El observador estacionario ve el estado $|0_{\text{caída libre}}\rangle$ lleno de partículas.

Flujo de partículas con energía positiva y una temperatura inversamente proporcional a la masa del agujero negro.



Flujo de partículas con energía negativa.

Horizonte

Al resolver las ecuaciones de cómo identifica el observador estacionario el vacío del observador en caída libre, se encuentra que el observador estacionario ve que en las inmediaciones del horizonte aparece un flujo de partículas con energía positiva que podrá ser detectado por dicho observador y un flujo de partículas con energía negativa entrando directamente al agujero.

Somos el producto de fluctuaciones cuánticas en el universo más temprano.

STEPHEN HAWKING

La imagen es plenamente consistente y, en principio, verificable experimentalmente. Desde el punto de vista del observador estacionario, la radiación de Hawking que recibe, de energía positiva, es exactamente compensada por la pérdida de masa del agujero negro, de manera que la energía total se conserva. Además, este observador, en teoría, es capaz de detectar la radiación de Hawking como un flujo de partículas a cierta temperatura. Sin embargo, en la práctica, dicho flujo está, en la actualidad, fuera de nuestra capacidad de observación porque para los agujeros negros astronómicos, cuya masa es muy elevada, la mencionada emisión es muy débil.

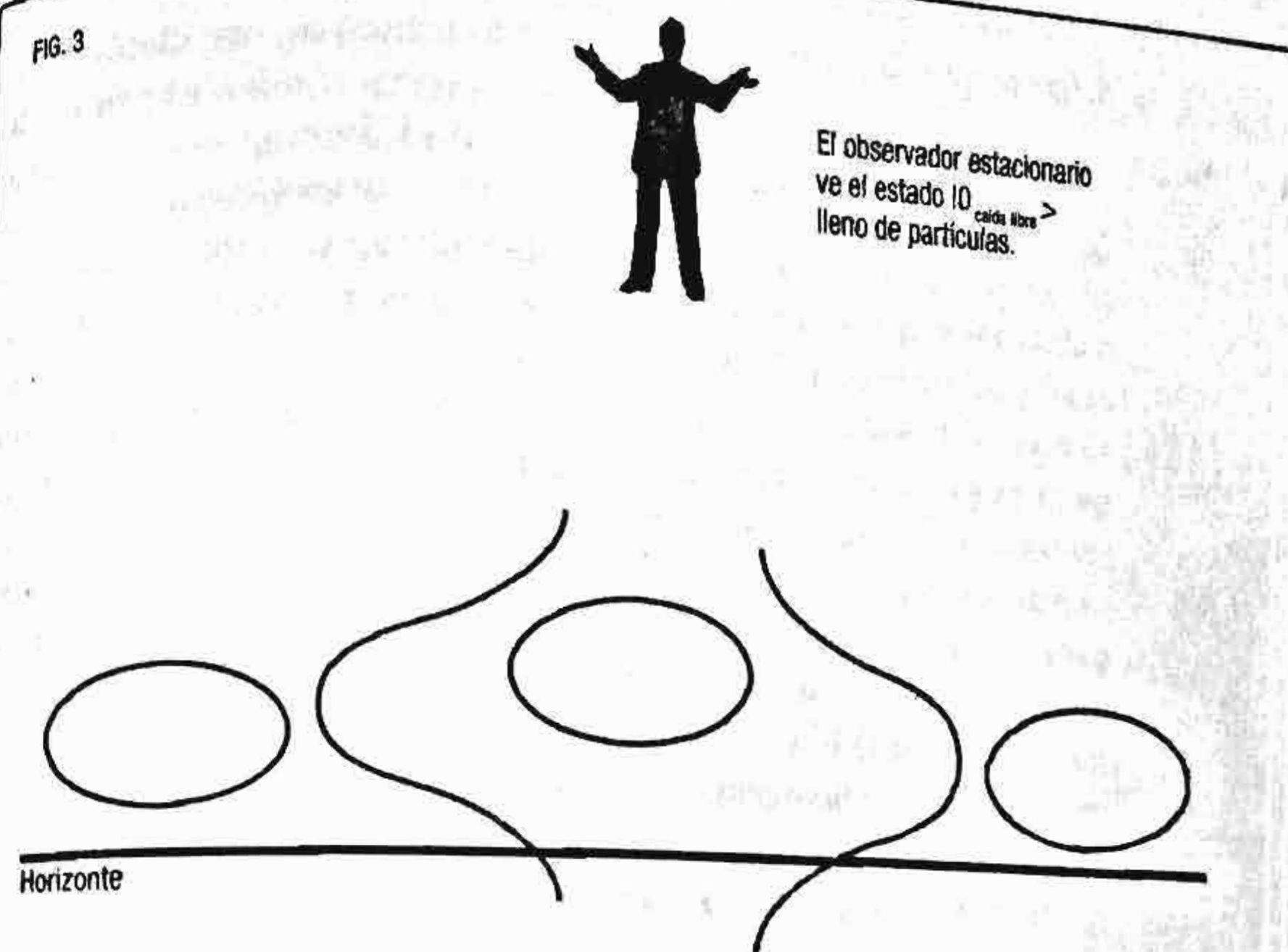
Por otro lado, el observador en caída libre verá un auténtico vacío, algo que se puede explicar de forma heurística porque estará en la situación justa en la que en cada punto y en cada instante el flujo de energía positiva y el de energía negativa estarán compensados, así que cualquier medida que efectúe sobre ese estado cuántico le llevará a determinar que está en medio de un vacío cuántico.

En los cálculos de Hawking, además, la radiación no sale directamente del agujero, sino que se genera en sus inmediaciones, de modo que, tanto desde el punto de vista de la energía como del comportamiento del agujero negro, la imagen es plenamente consistente con las leyes físicas y con las comprobaciones experimentales.

La radiación de Hawking se ha interpretado a partir de cómo el vacío se define diferente para diferentes observadores en un espacio-tiempo curvado, pero también se puede explicar desde el punto de vista de las fluctuaciones del vacío cuántico y de la correspondiente continua creación y aniquilación de partículas. Estas partículas no son observables, puesto que su tiempo de vida es tan breve que impide detectarlas. Además, las partículas que aparecen y desaparecen en el vacío se forman por pares, para satisfacer la conservación de la carga eléctrica y otras magnitudes. Si uno de estos pares se forma cerca del horizonte,

La imagen es plenamente consistente y, en principio, verificable experimentalmente. Desde el punto de vista del observador estacionario, la radiación de Hawking que recibe, de energía positiva, es exactamente

FIG. 3



La aparición y desaparición de partículas en las inmediaciones del agujero negro, en el seno del vacío cuántico, se representa según los diagramas de Feynman mediante bucles cerrados; esto indica que los pares de partículas se crean y se absorben en el vacío sin dejar rastro, como ocurre en el efecto Schwinger. Sin embargo, algunos de estos pares pueden abrir el bucle, con lo que un observador estacionario vería radiación de partículas proveniente del horizonte, algo que solo puede ocurrir si el campo gravitatorio presente está proporcionando la energía para que estas partículas pasen de la virtualidad de las fluctuaciones del vacío a la realidad de un flujo de partículas. En otras palabras, el agujero pierde masa y por tanto se evapora.

puede que uno de sus miembros caiga en el agujero y el otro se aleje de él. Pero este proceso consumirá energía, debido a que las partículas que se alejan del agujero son ahora partículas detectables, como ocurría en el efecto Schwinger. Lo que proporciona esta energía, de forma análoga al mencionado efecto Schwinger, es el campo gravitatorio en las inmediaciones del agujero negro, así que la energía gravitatoria del agujero deberá disminuir durante la emisión, lo que implica en última instancia que su masa se reducirá en el proceso. La imagen (representada en la figura 3) es pues totalmente consistente con la explicación más formal expuesta con anterioridad.

Este fenómeno no ha podido confirmarse por observaciones directas en agujeros negros. Para empezar, no hay disponibles agujeros negros cercanos, y aunque estuvieran a una distancia accesible, la temperatura de la radiación Hawking es demasiado pequeña para agujeros negros de tamaño astrofísico. Por ejemplo, un agujero con la masa del Sol emitiría radiación Hawking a una temperatura de $0,00000006$ K, es decir, bastante más baja que la radiación cósmica de fondo, que está a $2,71$ K, y por lo tanto no podría ser detectada. Además, cuanto mayor es el agujero, menor es la temperatura de la radiación Hawking que este emite y más difícil es detectarla.

Aunque su detección en astrofísica todavía está lejos de ser posible, la radiación Hawking se asienta en principios muy fundamentales de la física y su existencia no se cuestiona. Por otro lado, parece que hay evidencias preliminares de que los sistemas de materia condensada, como los *condensados de Bose-Einstein*, que en determinadas condiciones emulan el comportamiento de un agujero negro, presentan el análogo de este efecto Hawking. Un sistema de materia condensada es una fase de la materia que surge cuando el número de átomos del sistema es muy grande y las interacciones entre estos son muy fuertes.

Lo que se puede asegurar es que este efecto demuestra que el concepto de vacío no es fácil de definir en física en todas las situaciones. Como se ha visto tanto en el caso del efecto Unruh como en la radiación Hawking, distintos observadores no identifican el mismo estado de vacío. Eso tiene profundas consecuencias en la comprensión de la teoría cuántica de campos en presencia de espacio-tiempos curvos, es decir, con gravedad. En estos casos, tanto la noción de vacío cuántico como la de las propias partículas no se pueden definir de una forma absoluta, en la que todos los observadores posibles coincidan.

HORIZONTES COSMOLÓGICOS

Un universo en expansión es otra de las situaciones que puede presentar horizontes en cosmología. En efecto, si dicho universo

se expande, y si lo hace aceleradamente como el nuestro, podrá presentar puntos del espacio-tiempo con los que no sea posible comunicarse enviando señales, o a los cuales sea imposible contemplar, porque la luz emitida desde ellos no podrá llegar hasta aquí, debido a que el espacio entre su posición y la Tierra se estará estirando a un ritmo tan alto que no podrá cubrir esa distancia.

En el contexto cosmológico se pueden dar dos fenómenos que provoquen la aparición de partículas del vacío. De un lado tenemos un proceso definido por Leonard Parker en 1962 en el que las partículas aparecerán desde el vacío por el efecto de la expansión del universo. Por otro lado, Gary Gibbons (1946) y Stephen Hawking (1942) introdujeron la generación de partículas a causa de la presencia de *horizontes cosmológicos*.

Creación por expansión

La línea de trabajo iniciada por Parker en su tesis doctoral en 1962, y que continúa hasta hoy en día, muestra un efecto sorprendente. La base de la idea es el estudio del comportamiento de los campos cuánticos definidos en un universo plano en expansión, tal y como ahora se sabe que es el nuestro. Los resultados obtenidos por Parker son muy concretos: si se estudia el número de partículas en dos instantes de tiempo en un universo en expansión, lo cual serviría igualmente para un universo en contracción, se obtiene que para tiempos más tardíos dicho número habrá aumentado. Así, empezando con un número nulo de partículas del vacío, un observador en un universo en expansión acabará determinando que en un tiempo posterior sí existen partículas presentes.

El proceso se puede interpretar como una excitación del vacío de los campos cuánticos por la propia expansión del universo. Dichas excitaciones se pueden a su vez describir como partículas asociadas a los distintos campos. Por lo tanto, la expansión actúa como fuente de partículas.

Este hecho es interesante y problemático a la vez porque implica que un observador en un universo que evoluciona, por

ejemplo expandiéndose, siempre tendrá una incertidumbre en el número de partículas que observa, debido a que el proceso de creación de las mismas es continuo en dicho universo. Esto lleva, de nuevo, a afrontar el problema de que la definición de partículas no es absoluta, sino que está ligada a observadores e incluso al propio espacio donde se definen. Entonces, el concepto de partícula es operativo en el sentido de que ayuda a entender los procesos físicos localmente, pero no es posible extrapolar las conclusiones que se extraen en términos de modelo de partículas a nivel global, ya que el número de estas puede haber variado en un determinado volumen. Por otro lado, el fenómeno puesto de manifiesto por Parker señala que el vacío es sensible a la evolución del espacio donde esté definido.

Este tipo de proceso podría haber sido importante en las etapas inflacionarias del universo, donde la expansión tenía un ritmo muy alto. De hecho, hay resultados que apuntan a que la creación de partículas propuesta por Parker a partir del vacío cuántico es trascendental para entender cómo se obtuvieron las partículas que dieron lugar a nuestro universo a partir del vacío del inflatón. Los estudios muestran que este proceso genera pequeñas diferencias en la densidad de partículas en distintas regiones, que son compatibles con la generación de las fluctuaciones de temperatura que se aprecian en la radiación cósmica de fondo.

Creación de partículas

El segundo de los efectos asociados a la creación de partículas desde el vacío en un universo con expansión acelerada es el conocido como *efecto Gibbons-Hawking*, que fue planteado por primera vez en 1977 y que se da cuando hay horizontes presentes. Este trabajo es una evolución natural de los resultados obtenidos por Hawking en 1975 sobre la radiación de los agujeros negros.

Como se ha mencionado anteriormente, en un universo en expansión acelerada, y ante un observador dado, habrá regiones del espacio que nunca se podrán comunicar con otras. Por ejemplo,

desde una perspectiva terrestre, en el universo habrá regiones del espacio-tiempo de las que nunca se tendrá noticia ni será posible comunicarse con ellas porque la luz de su región no podrá alcanzar a la nuestra —el espacio entre esa región y la Tierra crecerá a una velocidad más rápida que la velocidad de la luz—. Así, todo observador puede describir un horizonte que delimite tales regiones.

Una vez definido el horizonte, la cadena de razonamientos que lleva a la emisión de partículas en sus inmediaciones es la misma que para la radiación Hawking o el efecto Unruh: el vacío cuántico depende de cómo se defina el espacio-tiempo en que nos encontremos, y para un observador que se encuentra en una región con un horizonte, el vacío emite partículas en las inmediaciones del horizonte.

Aunque este fenómeno pueda parecer muy similar al que se describe para los agujeros negros, tiene algunas sutiles diferencias respecto a este. Un rasgo importante es que el horizonte del que se habla en este contexto de un universo en expansión acelerada depende de la posición del observador. Aquí es posible delimitar un horizonte que esté asociado a la posición que ocupamos en el cosmos, de tal manera que diferentes observadores describirán distintos horizontes. Esta es una diferencia sustancial respecto al agujero negro, porque en esta situación el horizonte es el mismo para todos los observadores, ya que el agujero está localizado. Que en el caso de un universo en expansión acelerada se generen partículas, como demostraron Gibbons y Hawking, lleva a la conclusión de que es la mera presencia de un horizonte, como se ha remarcado repetidamente, la que introduce una asimetría en la definición del vacío que lleva a algunos observadores a verlo como un baño de partículas con una determinada temperatura.

La otra diferencia que hay que subrayar es que en el caso de un horizonte asociado a un observador en un universo en expansión acelerada, dicho horizonte rodea al observador. Es decir, el observador tiene un límite en todas las direcciones del espacio-tiempo para lo que puede llegar a observar. Y es una diferencia interesante, porque la radiación de partículas emitidas desde

el vacío en las inmediaciones del horizonte será absorbida por el mismo tras propagarse hasta el otro extremo de la región delimitada por él. Es entonces cuando se produce un proceso de equilibrio neto entre lo emitido y lo absorbido, un hecho que soluciona un potencial problema asociado al efecto Gibbons-Hawking: si la presencia de un horizonte crea partículas, pero cada observador tiene un horizonte, entonces se están creando partículas desde el vacío a coste cero —no hay nada aportando la energía necesaria—. Debido a que este proceso presenta un equilibrio entre lo emitido y lo absorbido, la conservación de la energía no es un problema y todo tiene sentido.

La temperatura de la radiación procedente del horizonte cosmológico es ridículamente pequeña, así que su detección hoy por hoy está fuera de nuestra capacidad tecnológica. Pero sí es posible imaginar que se pueda detectar parte de esta radiación. Si se efectúa tal detección se habrá sustraído un determinado número de partículas de la radiación Gibbons-Hawking que no serán absorbidas de nuevo por el horizonte. Eso implica que esa energía no será devuelta, así que el efecto será que nuestro horizonte se reducirá; no mucho, evidentemente, pero lo hará. La cuestión se resuelve notando que en el proceso de observación el detector ha absorbido energía, y que por lo tanto ha aumentado su cantidad de energía, provocando ello que la gravedad que genera haya aumentado un poco. Todo esto combinado parece solucionar el problema planteado.

EL VACÍO, UN CONCEPTO DIFÍCIL DE MANEJAR

La idea clave final es que la presencia de horizontes provoca que el vacío cuántico no esté definido de la misma manera para todos los observadores. Distintos observadores identificarán distintos vacíos, y eso hace que se den fenómenos donde un vacío para una determinada clase de observadores se vea lleno de partículas con una determinada temperatura para otra clase de ellos.

Esta idea confirma que el vacío no es un concepto fácil de manejar fuera de situaciones donde no haya curvatura ni evolución

del espacio-tiempo, y eso acaba afectando a la propia definición de partícula, cuyo número no está libre de esta dependencia del observador.

En la práctica, se trata de hechos irrelevantes para la humanidad, porque esta se encuentra en regiones del espacio-tiempo donde la expansión no influye, la curvatura generada por la gravedad terrestre es muy suave y no existe acceso a aceleraciones muy elevadas y mantenidas por largo tiempo, así que todo parece comportarse según las reglas de la relatividad especial, donde el vacío tiene una definición concreta.

La idea de vacío que se ha ido dibujando en el último siglo lo aleja de la idea filosófica de «nada absoluta», convirtiéndolo en uno de los pilares fundamentales para el estudio de la estructura última de la materia y el universo. Las propiedades cuánticas y relativistas de nuestras teorías sitúan al vacío en el núcleo de los problemas asociados al origen del universo, la energía oscura, el motivo de la existencia de la masa, la estabilidad de nuestro universo, el comportamiento de los sistemas cuánticos más elementales, etc. En definitiva, el vacío es la pieza clave en el puzle de la física fundamental. Incluso las propuestas teóricas más avanzadas, como la teoría de supercuerdas y derivadas, encuentran en el vacío y su estructura uno de sus mayores retos para poder dilucidar si de esos marcos teóricos se puede extraer nuestro universo. Aún queda mucho camino por recorrer para tener una respuesta completa a las preguntas que conciernen al origen, estructura y funcionamiento básico de nuestro universo, pero sea cual sea el resultado final, el vacío se hallará en la clave de la solución.

- BARROW, J.D., *El libro de la nada*, Barcelona, Crítica, 2009.
- BORJA, E.F., *Un universo en 205 páginas*, Publicaciones Universidad de Sevilla, 2015.
- CASAS, A., *El lado oscuro del universo*, Madrid, CSIC/Los Libros de la Catarata, 2010.
- CASAS, A. Y RODRIGO, T., *El bosón de Higgs*, Madrid, CSIC/Los Libros de la Catarata, 2012.
- COX, B. Y FORSHAW, J., *El universo cuántico*, Barcelona, Debate, 2014.
- : *¿Por qué $E = mc^2$? ¿Y por qué debería importarnos?*, Barcelona, Debate, 2014.
- FERNÁNDEZ, J.L., *Agujeros negros*, Madrid, CSIC/Los Libros de la Catarata, 2014.
- FERREIRA, P., *La teoría perfecta*, Barcelona, Anagrama, 2014.
- GUTH, A.H., *El universo inflacionario*, Barcelona, Debate, 1999.
- HOOFT, G., *Partículas elementales: En busca de las estructuras más pequeñas del universo*, Barcelona, Planeta, 2013.
- JOE, D., *Introducción al mundo cuántico*, Barcelona, Pasado & Presente, 2013.

- KRAUSS, L.M., *Un universo de la nada*, Barcelona, Pasado & Presente, 2013.
- RANDALL, L., *El descubrimiento del Higgs*, Barcelona, Acantilado, 2012.
- SEARA, M., *Hasta el infinito y más allá*, Barcelona, Destino, 2015.
- SUSSKIND, L., *La guerra de los agujeros negros*, Barcelona, Crítica, 2013.
- THORNE, K.S., *Agujeros negros y tiempo curvo*, Barcelona, Crítica, 2000.

ÍNDICE

- agujero negro 133, 136-144, 147
- Aristóteles 8, 16, 17
- átomo 10, 15, 40-47, 59, 62-64, 69, 72, 74, 76, 95, 97-99, 102, 103, 125, 144
- bariones 61, 62
- Big Bang 94, 121
- bosones 60-64, 66, 96
- Boyle, Robert 18
- campo cuántico 48, 65, 134, 145
- carga 41, 46, 52, 60, 63, 64, 69
- de color 61, 62, 64
- eléctrica 9, 33, 40, 41, 46, 52-54, 59-64, 73, 74, 85, 97-99, 102, 103, 136, 142
- Casimir
- efecto véase efecto Casimir
- fuerza 48, 49, 55
- COBE 102, 109
- color, confinamiento del 61
- cono de luz 131, 132, 134, 135
- cosmología 11, 16, 17, 19, 83, 84, 88, 90, 94, 95, 98, 99, 102, 104, 107, 110, 112, 115, 121, 122, 144
- cromodinámica cuántica 61, 72, 73
- cuántica 8, 9, 11, 13, 24, 27-30, 32-34, 39-44, 46, 49-52, 55, 59-61, 65, 66, 73, 76, 116-118, 126, 130, 133, 140, 144, 149
- Demócrito 15
- densidad
- crítica 106, 107, 110, 111, 114, 116, 117
- de energía 91, 94, 100, 104, 106, 107, 110-114, 116, 117, 120, 124, 125
- Descartes, René 18, 22
- desplazamiento al rojo 86, 87, 90, 112

diagramas espacio-tiempo 131, 134
 ecuación
 de Dirac 44, 46, 47
 de Schrödinger 42-44
 efecto
 Casimir 40, 47, 49, 50, 55, 73
 Lamb 40, 46, 47, 55
 lente gravitatoria 87-89, 107, 111
 Parker 130, 145, 146
 Schwinger 40, 51-53, 143
 Unruh 132, 133, 136, 140, 144, 147
 Einstein, Albert 24, 54, 73, 104, 106, 115, 116
 electrodinámica cuántica 46
 electromagnetismo 22, 24, 25, 41, 46, 50, 61, 62, 84, 96
 electronvoltio 45, 72
 energía
 mínima 8, 9, 34, 35, 39, 40, 42, 55, 66-68, 76, 116, 118, 119, 121, 123, 124, 129, 130
 niveles de 42, 43, 45, 46
 oscura 11, 83, 109, 112, 113, 115, 117, 120, 149
 espectro 44, 45
 de potencias 101, 105, 113
 electromagnético 44, 45, 85, 86
 espín 33, 43, 52, 60
 estado 8, 9, 11, 26, 28, 30, 34, 37, 39, 40, 42-44, 46, 55, 60, 61, 64-68, 76, 77, 94, 96, 98, 99, 114-116, 118, 119, 121-125, 127, 129, 130, 132, 140-144
 excitado 44
 fundamental 42, 46
 éter 8, 16, 17, 19, 22-24

fermiones 43, 60, 62, 63
 Feynman, Richard 46, 52
 diagrama de 52, 53, 143
 fluctuaciones 8-10, 32, 39, 40, 46, 48-52, 55, 65, 66, 68, 73, 74, 76, 101, 105, 107, 113, 118, 121, 124, 125, 129, 142, 143, 146
 fotones 33, 43-46, 48, 50-52, 61-63, 69, 76, 87, 95, 97-100, 102, 103, 109
 Fresnel, Augustin-Jean 22
 Galilei, Galileo 8, 18
 gluones 60-63, 69, 72-75, 96
 Gran Colisionador de Hadrones (LHC) 7, 64, 71
 gravitación 19, 126
 Guericke, Otto von 19, 20
 Heisenberg, Werner 29-31, 39, 41, 51
 Higgs, Peter 64, 68, 76
 bosón de 63, 64, 66
 campo de 10, 64-69, 72, 76-79, 96, 118
 mecanismo de 64, 65, 69
 partícula de 63, 64, 66, 69, 71, 77, 78
 Hooke, Robert 18
 horizonte 129, 130, 132-134, 136-148
 Hubble, Edwin 84, 87, 90, 92
 telescopio espacial 88, 89, 112
 inflación 117-119, 121-125, 146
 inflatón 118, 119, 121-125, 146
 interacción
 débil 61, 62, 64, 96
 fuerte 34, 61, 62, 96

kelvin, grado 95, 100
 Leucipo de Mileto 15
 leptones 62-64, 69
 longitud de onda 45, 48, 85-87, 90, 99, 102
 Lorentz, Hendrik Antoon 23, 27
 masa 10, 12, 16, 28, 31, 33, 37, 52, 54, 57, 60-65, 68, 69, 72-79, 88, 96, 111, 130, 131, 133-136, 140-144, 149
 materia oscura 88, 109, 111, 113, 116, 117
 Maxwell, James Clerk 22, 25, 26, 84
 mesones 61
 Michelson, Albert A. 23, 24
 modelo estándar (de partículas) 59-65, 68, 69, 77, 116, 117
 Morley, Edward W. 23, 24
 multiverso 122
 nada 8, 9, 15, 19, 24, 55, 92, 149
 neutrinos 62-64, 95, 96
 Newton, Isaac 19, 22, 42
 observable 9, 28-30, 39
 observador inercial 24, 26, 27, 130-132, 134, 138
 ondas electromagnéticas 25, 41, 85, 87
 orbitales 44
 partícula 7-12, 22, 28, 30, 33-35, 37, 39-41, 43, 46, 50-57, 59-69, 71, 72, 74, 76-79, 83, 94-97, 102, 111, 116-123, 127, 129-137, 140-149
 Penzias, Arno A. 98

Planck
 constante de 31, 47
 misión 100, 102, 108, 109
 principio
 de exclusión de Pauli 43
 de indeterminación 29-31, 39, 41
 quarks 60-65, 69, 72-75, 77, 78, 95, 96
 radiación
 cósmica de fondo 7, 98-102, 104, 107, 111-113, 120, 124, 125, 144, 146
 Gibbons-Hawking 130, 146, 148
 Hawking 11, 129, 144, 147
 regularización 51
 relatividad 13, 24, 26, 32, 33, 42, 44, 130, 131, 133, 138, 149
 general 24, 27, 83, 87, 88, 104, 106, 114-116, 137, 138
 renormalización 51
 Small Flash 121
 supernova 98, 112, 137
 superposición 28
 teoría
 cuántica de campos 32, 49, 51, 52, 55, 59, 60, 76, 116, 130, 133, 140, 144
 de la gran unificación (GUT) 95, 96
 Torricelli, Evangelista 8, 18, 19
 universo 10-12, 16, 17, 19, 24, 26, 29, 34, 51, 68, 79, 81, 83, 84, 87, 88, 90-92, 94-102, 104, 106,

107, 109, 110, 112, 114, 115,
117-120, 122, 124-126, 130, 136,
137, 142, 146, 147, 149
abierto 106, 107, 110-113
cerrado 106, 107, 110, 113
expansión del 10, 84, 86, 90-
93, 97, 99, 112, 115-117, 120,
129, 136, 144-147
plano 106, 107, 110, 111, 113-
115, 124, 145

vacío 7-13, 15, 16, 18, 19, 22, 24-
27, 32, 34, 37, 39, 40, 46-57, 65,
66, 68, 69, 72-79, 81, 84, 85, 94,

104, 110, 112, 114-118, 120-122,
124-127, 129-137, 140-149
falso 34, 66-68, 118, 119, 121-
125
inestable 77
metaestable 77-79
verdadero 66, 68, 118, 124
velocidad de la luz 9, 23-27, 47,
61, 69, 72, 85, 130-135, 147

Wilson, Robert W. 98

WMAP 100, 102, 109

Young, Thomas 22